



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# NEDESTRUKTIVNÍ TOPOGRAFIE STĚN DUTÝCH LOPATEK PLYNOVÝCH TURBÍN

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2303T002 – Strojírenská technologie  
*Autor práce:* **Bc. David Vaněk**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.





# NONDESTRUCTIVE TOPOGRAPHY OF HOLLOW GAS TURBINE BLADES

## Diploma thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2303T002 – Engineering Technology  
*Author:* **Bc. David Vaněk**  
*Supervisor:* doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Vaněk**

Osobní číslo: **S12000469**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie**

Název tématu: **Nedestruktivní topografie stěn dutých lopatek plynových turbín**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte způsoby nedestruktivního měření tloušťky stěn.
2. Stanovte tloušťky křivých stěn v předepsaných místech vzorků dutých lopatek plynových turbín ze žárupevných Co a Ni slitin litých na voskový model.
3. Odladte a porovnejte výsledky několika metod (UT, ET, MT).

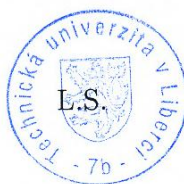
Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 40-50 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1  
[2] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3  
[3] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2008. ISBN-978-80-7204-591-4

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.  
Katedra materiálu

Datum zadání diplomové práce: 9. března 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 20. května 2016

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



prof. Ing. Petr Louda, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 9. března 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá nedestruktivním měřením tloušťky stěn dutých turbínových lopatek zhotovených z žárovevných slitin niklu První brněnskou strojírnou Velká Bíteš, a.s. Stanovení tloušťky stěn probíhalo třemi metodami a to metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny, jejichž výsledky byly porovnány jak vzájemně, tak i s hodnotami naměřenými metrologickými metodami. Diplomová práce rovněž obsahuje diskuzi výsledků, doporučení nejvhodnější metody a náměty pro další výzkum.

## **Klíčová slova**

Nedestruktivní měření tloušťky stěny, ultrazvuková metoda, metoda vířivých proudů, metoda magnetické skvrny, turbínové lopatky, žárovevné slitiny niklu.

## **Annotation**

The diploma thesis deals with non-destructive measurement of wall thickness of hollow turbine blades. The turbine blades are made from heat-resistance nickel alloys by company První brněnská strojírna Velká Bíteš. Determination of wall thicknesses was carried out by three measurement methods. There were ultrasound method, eddy current method and method of magnetic spot. Results were compared each other and there were compared with results measured by metrology methods as well. The diploma thesis also includes a discussion of the results, recommendation of most suitable methods and suggestions for further research.

## **Key words**

Non-destructive wall thickness measurement, ultrasound methods, eddy current method, method of magnetic spot, turbine blades, heat resistant nickel alloys.

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za obětavou pomoc při řešení zadaného tématu nejen v teoretické rovině, ale i za vedení při praktickém měření.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod .....	11
2 Teoretická část .....	12
2.1 Základní přehled metod nedestruktivního zkoušení.....	12
2.1.1 Zkoušky ultrazvukem .....	13
2.1.2 Metoda vířivých proudů .....	18
2.1.3 Metoda magnetické skvrny .....	19
2.2 Lopatkové stroje .....	21
2.3 Slitiny niklu a kobaltu .....	22
3 Experimentální část .....	27
3.1 Úvod do experimentu.....	27
3.1.1 Lopatka 02 .....	27
3.1.2 Lopatka T40 .....	29
3.1.3 Lopatka 05 .....	32
3.2 Použité zařízení a postup měření .....	39
3.2.1 Dio 562 LC.....	39
3.2.2 Nortec 1000 .....	44
3.2.3 NDT1 Kraft K5 .....	49
3.2.4 DOMENA B3.b .....	51
3.3 Výsledky měření .....	54
3.3.1 Lopatka 02 .....	54
3.3.2 Lopatka T40 .....	56
3.3.3 Lopatka 05 .....	57
4 Diskuze výsledků.....	61
5 Závěr .....	65
6 Zdroje.....	66
7 Seznam příloh .....	68



## Seznam použitých zkratek a symbolů

$a(t)$	výchylka částice z rovnovážné polohy v čase $t$	[m]
$A$	tažnost	[%]
$A_0$	maximální výchylka částice – amplituda	[m]
$c$	rychlost šíření vlny	[m/s]
$c_u$	rychlost zvuku nastavená v defektoskopu	[m/s]
$d$	tloušťka materiálu	[m]
$f$	frekvence	[Hz]
$H_0$	intenzita magnetizačního pole	[A/m]
$H_r$	intenzita remanentního magnetického pole	[A/m]
$I_r$	magnetická polarizace	[T]
$k_1, k_2$	hodnoty prvního a druhého koncového echa	[dB]
$L$	skutečná tloušťka	[mm]
$L_u$	tloušťka změřená ultrazvukem	[mm]
$N$	demagnetizační činitel	[-]
NDT	nedestruktivní zkoušení materiálu	[-]
$p$	akustický tlak	[Pa]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$s$	standardní hloubka vniku	[m]
$t$	čas	[s]
$T$	perioda	[m]

$v$	rychlost kmitání částic okolo rovnovážné polohy	[m/s]
$x$	vzdálenost kmitajícího bodu od počátku	[m]
$z$	akustická impedance (akustický vlnový odpor prostředí)	[Pa·s·m <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	koeficient útlumu ultrazvuku	[dB /mm]
$\gamma$	základní matrice slitiny niklu	[-]
$\gamma'$	precipitační vytvrzující fáze Ni <sub>3</sub> (Al, Ti) ve slitinách niklu	[-]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
$\mu$	permeabilita	[H/m]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[H/m]
$\mu_r$	relativní permeabilita	[-]
$\rho$	měrná hmotnost prostředí	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	rezistivita	[Ω·m]
$\sigma$	měrná elektrická vodivost	[S/m]
$\omega$	kruhová frekvence	[rad·s <sup>-1</sup> ]

# 1 Úvod

Současný trend zvyšování požadavků na kvalitu výrobků je důvodem ke stálému rozvoji technik a způsobů kontroly. Kontrola je nezbytnou součástí výrobního procesu a spolu s bezchybnou výrobou bývá zárukou požadovaných provozních a bezpečnostních vlastností výrobků, jako jsou jakost, spolehlivost a dlouhodobá životnost.

Metody kontroly se dělí na dvě základní odvětví a to na metody destruktivní a nedestruktivní. U metod destruktivních dochází k nevratnému poškození výrobku, což především u kusové či malosériové výroby bývá nepřijatelné. Nedestruktivní metody zkoušení oplývají nespornou výhodou, že k poškození zkoušeného výrobku nedochází. Jedná se o významný důvod, proč se nedestruktivní metody posouvají čím dál více do popředí zájmu. Nedestruktivní metody nacházejí uplatnění ve strukturoskopii, defektoskopii, ale i při měření tloušťek vrstev a stěn. Dodržení předepsané tloušťky stěny výrobku je jedním z důležitých faktorů, který rozhoduje o shodnosti či neshodnosti výrobku. Diplomová práce pojednává o měření tloušťek stěn turbínových lopatek, což jsou velice mechanicky i tepelně namáhané součásti lopatkových strojů. Zeslabení stěn u takto exponovaných výrobků by mohlo značně ovlivnit jejich pevnostní vlastnosti a bezchybný provoz. A právě k odhalování neshodných výrobků v průběhu výroby jako prevence slouží nedestruktivní metody zkoušení materiálu, jejichž hlavním úkolem je tak předcházet případným haváriím, a tím vzniklým finančním škodám, nehledě na případné ohrožení lidského zdraví, či dokonce životů.

Diplomová práce vznikla na základě požadavku výrobce turbínových lopatek, společnosti První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s.

V teoretické části diplomové práce jsou stručně představeny metody nedestruktivního zkoušení se zaměřením na nedestruktivní metody měření tloušťek, kterými se práce zabývá. Dále je pozornost zaměřena na využití lopatkových strojů a skupinu materiálů označovaných jako superslitiny niklu, které jsou typickým materiálem právě těchto lopatek. Navazující experimentální část představuje použité metody a postupy zkoušení, použité přístroje, zjištěné výsledky a jejich diskuzi.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Základní přehled metod nedestruktivního zkoušení

Nedestruktivní zkoušení materiálu (NDT) je často používaný pojem spadající do oboru zkoušení materiálových vlastností. Základním dělením obecných metod zkoušení materiálu je dělení na metody destruktivní a metody nedestruktivní. Mezi metody destruktivní řadíme všechny metody, při nichž dojde k poškození daného vzorku a tudíž jeho znehodnocení pro další použití.

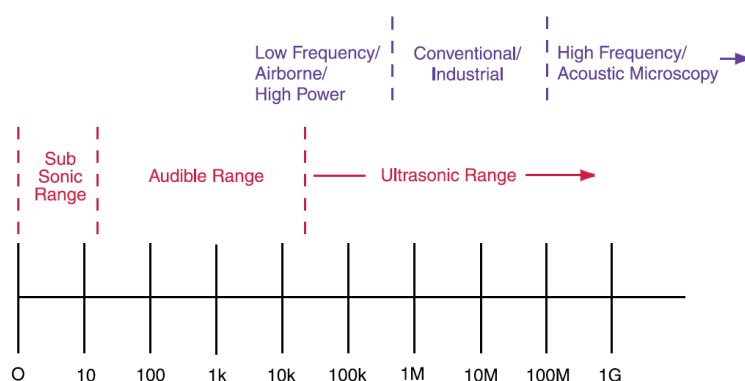
Nedestruktivní zkoušení materiálu zahrnuje metody používané pro zkoušení určitého produktu, materiálu nebo systému, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci [1].

Základními obory nedestruktivního zkoušení jsou defektoskopie a strukturoskopie. Strukturoskopie se zabývá složením daného materiálu, zatímco defektoskopie je obor zabývající se odhalováním povrchových a podpovrchových defektů materiálu. Metody používané pro zjišťování povrchových defektů jsou metody vizuální a kapilární. Metody magnetické a magnetoinduktivní, spolu s testováním vířivými proudy mohou být používány jak pro hledání povrchových, tak i podpovrchových defektů. Metody ultrazvukové a prozařovací se používají k detekci vnitřních vad [2].

Diplomová práce je zaměřená na nedestruktivní metody měření tloušťky stěn dutých lopatek plynových turbín, a proto zde budou přiblíženy pouze ty metody, které v této problematice nalézají své uplatnění. V současné době se zmíněné měření provádí téměř výhradně metodami ultrazvukovými. Dále námi použité metody jsou metoda vířivých proudů a metoda magnetické skvrny.

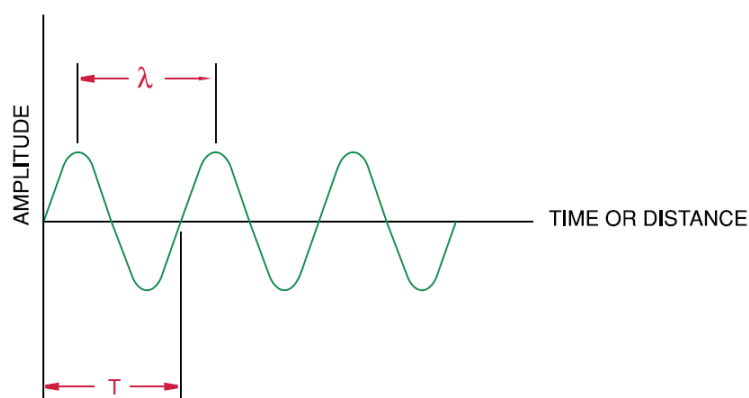
### 2.1.1 Zkoušky ultrazvukem

Zvuk generován nad hranicí lidské slyšitelnosti (obvykle 20 kHz) je nazýván ultrazvuk. Rozsah frekvencí používaných v nedestruktivním zkoušení bývá od 100 kHz do 50 MHz. Ultrazvuk je pro nedestruktivní metody testování užitečný svojí podstatně kratší vlnovou délkou, než má zvuk slyšitelný. Z toho plyne schopnost vlnění se odrážet i od velmi malých povrchů, jakými jsou právě defekty uvnitř materiálu.



Obr.1 Akustické spektrum [3]

Ultrazvukové vlnění putuje ve formě vlny, podobně jako se pohybuje světelné vlny. Na rozdíl od světelných vln, které se mohou pohybovat i ve vakuu, ultrazvukové vlnění vyžaduje ke svému pohybu elastické prostředí ať už kapalné či pevné. Základními parametry takového vlnění jsou vlnová délka  $\lambda$  a perioda  $T$ .



Obr. 2 Základní parametry ultrazvukového vlnění [3]

Počet cyklů během jedné sekundy je označováno jako frekvence  $f$  a její jednotkou je Hertz. 1Hz představuje 1 cyklus za sekundu.

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad [\text{m}] \quad (2)$$

$\lambda$	vlnová délka	[m]
$f$	frekvence	[Hz]
$T$	perioda	[m]
$c$	rychlost šíření vlny	[m/s]

Rychlost šíření vlny je konstantní v ideálně homogenním materiálu, při dané teplotě a tlaku.

Pohyb vlny je umožněn kmitavým pohybem částic elastického prostředí okolo jejich rovnovážných poloh. Pohyb vln se přenáší soudržnými silami částic z jedné částice na částice okolní. Takovýto vzruch je popsán vlnovou rovnicí [1].

$$a(t) = A_o \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

$a(t)$	výchylka částice z rovnovážné polohy v čase $t$	[m]
$A_o$	maximální výchylka částice – amplituda	[m]
$\omega$	kruhová frekvence ( $\omega=2\pi f$ )	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$t$	čas	[s]
$x$	vzdálenost kmitajícího bodu od počátku	[m]
$c$	rychlost šíření vlny	[m/s]

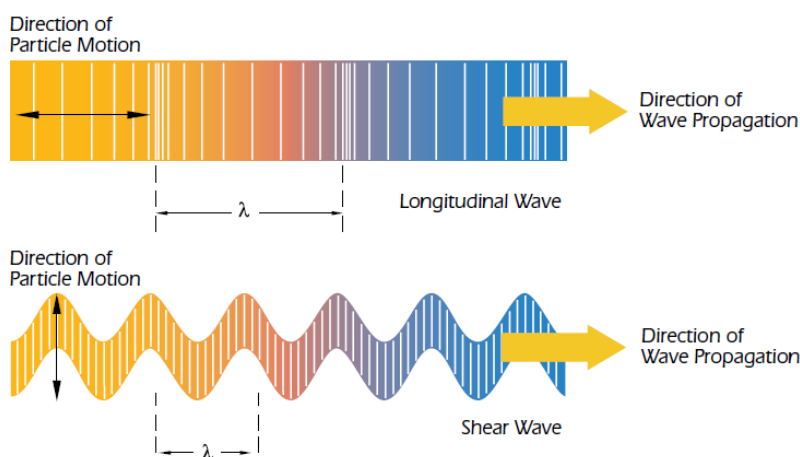
Vlnění v prostředí způsobuje periodické stlačování a roztahování částic prostředí. Vyvolaný stav napjatosti je nazýván akustický tlak  $p$ .

$$p = z \cdot v \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

$$z = \rho \cdot c \quad [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (5)$$

$p$	akustický tlak	[Pa]
$v$	rychlost kmitání částic okolo rovnovážné polohy	[m/s]
$z$	akustická impedance (akustický vlnový odpor prostředí)	[Pa·s·m <sup>-1</sup> ]
$\rho$	měrná hmotnost prostředí	[kg/m <sup>3</sup> ]

Šíření vlny může být různé v závislosti na směru kmitání částic a dělíme je na vlnění podélné, příčné, povrchové a deskové. Ultrazvuková defektoskopie zpravidla využívá vln podélných a příčných.



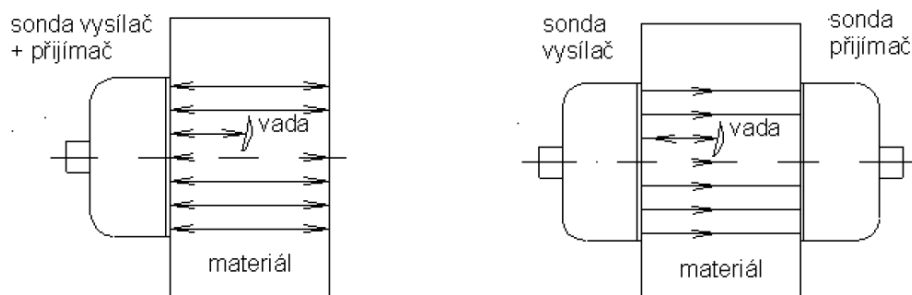
Obr. 3 Druhy vlnění, horní obr. je vlnění podélné, obr. spodní je vlnění příčné [3]

Druh šíření vlny, elastické vlastnosti prostředí a rozměrový poměr vlnové délky s prostředím jsou rozhodující faktory ovlivňující rychlost šíření ultrazvukových vln v materiálu. U podélného vlnění mají navíc vliv na rychlost šíření i tvar a druh zkoušeného výrobku. Velikostní poměr vlnové délky a prostředí hraje výraznou roli při rozlišitelnosti jednotlivých vad. Vlnová délka se musí volit s přihlédnutím k faktu, že ultrazvukem lze prokazovat jen takový defekt, jehož příčné rozměry kolmé na směr šíření vlnění jsou větší než polovina délky vlny. Není-li toto splněno, vada není zjistitelná z důvodu ohybu ultrazvukových vln [2].

V průběhu šíření ultrazvukového vlnění pružným homogenním prostředím dochází k jeho zeslabování. S narůstající vzdáleností od zdroje tudíž klesá intenzita vlnění i amplituda kmitů. Důvodem toho je neustálé rozdělování energie vlny do stále většího prostoru, jakož i útlum v materiálu. Útlum v materiálu může být způsoben absorpcí, což je pohlcování ultrazvukového vlnění průchodem látkou způsobené vnitřním třením kmitajících částic, kde dochází ke ztrátě části mechanické energie přeměnou na energii tepelnou. Dalším mechanismem útlumu je rozptyl ultrazvukových vln v prostředí, především na jejich rozhraní. Větší útlum mají materiály, u nichž se vlnová délka blíží rozměru zrn. Hrubozrnější materiály mají tedy větší útlum, než mají materiály jemnozrné. Útlum ultrazvuku v materiálu je charakterizován koeficientem útlumu  $\alpha$  [dB/mm] [1,2].

Metody ultrazvukových zkoušek se dělí na metodu průchodovou, odrazovou, rezonanční a metodu umožňující zviditelnění vnitřních vad. Diplomová práce je zaměřena na měření tloušťek stěn, k čemuž se užívá téměř výhradně metody odrazové. Z tohoto důvodu je nadále popsána pouze tato metoda.

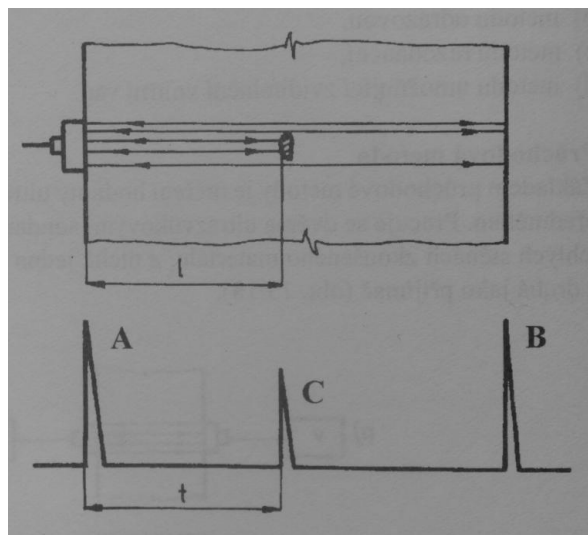
Odrazová metoda si vystačí s přístupem ke zkoumanému předmětu pouze z jedné strany, v čemž má nespornou výhodu oproti metodě průchodové, což jí řadí na post nejpoužívanější ultrazvukové metody. Princip metody spočívá ve vysílání krátkých ultrazvukových impulzů do kontrolovaného předmětu. Tyto impulzy se odrážejí nazpět od protilehlého povrchu i vnitřních vad a vracejí se zpět do sondy, která je v případě sondy dvouměníčové současně vysílačem i přijímačem.



*Obr. 4 Porovnání metody odrazové a průchozí [4]*

Výsledek měření je zobrazován na displeji přístroje ve formě ech. Počáteční echo je záznamem impulsu vstupujícího do materiálu, koncové echo je záznamem signálu navraceného. Případné echo odražené od vnitřního defektu se nachází mezi echem počátečním a koncovým.





Obr. 5 Princip odrazové metody [2]

Měření tloušťky ultrazvukem je poměrně častá aplikace ultrazvukových metod a je možné ji zkoušet na klasických ultrazvukových defektoskopech, ale i na speciálních ultrazvukových tloušťkoměrech. Měření většinou probíhá s piezoelektrickými měniči s frekvencemi 0,5 MHz -20 MHz. Pro hrubozrnné materiály a materiály s velkým útlumem je však zapotřebí volit nižší frekvence. Vyšší frekvence jsou naopak použitelné pro měření tenkostěnných materiálů s minimálním útlumem. Ultrazvukové měření tloušťky je založeno na měření času, který potřebuje signál na překonání dráhy od sondy k protilehlému povrchu a zpět. Za předpokladu konstantní rychlosti šíření zvuku v materiálu vypočteme tloušťku následovně [1]:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

d	tloušťka materiálu	[m]
c	rychlost šíření ultrazvuku v materiálu	[m/s]
t	čas od vyslání do návratu impulzu	[s]

### 2.1.2 Metoda vířivých proudů

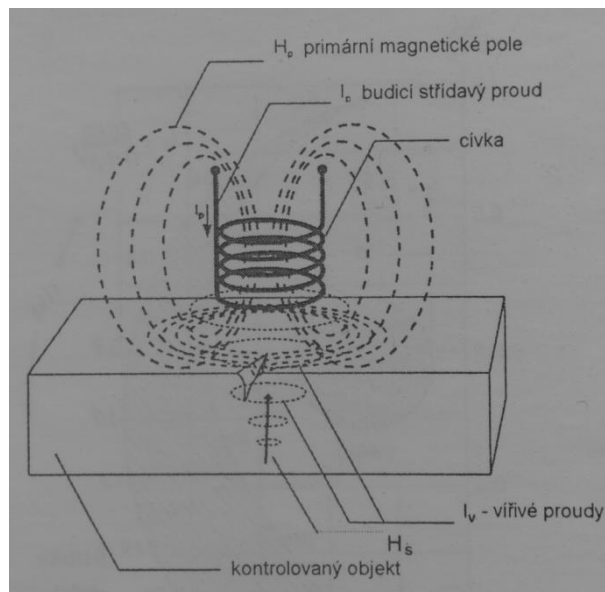
Metoda vířivých proudů využívá střídavého magnetického pole ke stanovení fyzikálních vlastností materiálu. Zkoušený předmět je magnetován střídavým proudem procházející cívkou, čímž se vytváří časově proměnné magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje ve zkoušeném předmětu elektromagnetickou sílu a vznikají tak proudy, které nazýváme proudy vířivými. Základem metody vířivých proudů je závislost hustoty a rozložení indukovaných vířivých proudů na fyzikálních vlastnostech a geometrii magnetovaného tělesa. Struktura materiálu určuje fyzikální vlastnosti zastoupené elektrickou vodivostí a permeabilitou, zatímco případná existence vad určuje geometrii. Vířivé proudy ovlivňují svými magnetickými účinky původní magnetické pole budící, které je po vektorovém součtu obou polí zeslabeno, čímž je dáno magnetické pole výsledné. Napětí indukované tímto výsledným magnetickým polem je parametr, dle kterého je měření vyhodnocováno.

U metody vířivých proudů rozlišujeme 2 metody měření:

- metoda s průchozí cívkou
- metoda s příložnou cívkou

V případě metody s průchozí cívkou prochází zkoumaný předmět cívkou s dvojím vedením – magnetizačním a snímacím. Metoda je vhodná pro automatickou kontrolu například tyčového materiálu.

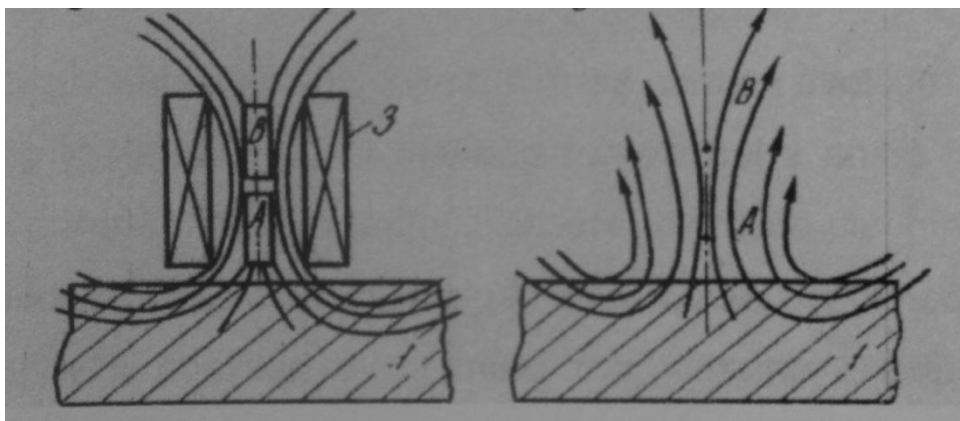
Metoda s příložnou cívkou se zaměřuje na kontrolu velkých a tvarově složitých výrobků. V tomto případě se cívka napájená střídavým proudem přikládá ke zkoušenému tělesu radiálně a osa budícího magnetického pole směřuje kolmo na zkoušený povrch. Magnetické pole vířivých proudů svým působením ovlivňuje vlastnosti příložné cívky a způsobuje změnu její impedance. Tato metoda je vhodná pro zjišťování vad materiálu, měření vodivosti, ale i měření tloušťky elektricky nevodivých vrstev na elektricky vodivém podkladu. [1, 2, 4]



Obr. 6 Princip přiložené cívky [1]

### 2.1.3 Metoda magnetické skvrny

Metoda magnetické skvrny, neboli metoda magnetického bodového pólu, je metoda spadající do magnetických strukturoskopických metod. Metoda spočívá v souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi, konkrétně remanentní intenzitou a strukturně mechanickým stavem materiálu. Metoda magnetické skvrny pracuje s tzv. doménami. Magnetická doména je elementární oblast materiálu se shodně orientovanými atomárními magnetickými dipóly. Není-li materiál vystaven vnějšímu magnetickému poli, materiál se na makroskopické úrovni jeví jako demagnetizován. Důvodem jsou rozdílně orientované magnetické domény, jejichž výsledný magnetický moment je z makroskopického pohledu nulový. Přítomnost vnějšího magnetického pole  $H_0$  způsobí místní skokovou změnu orientace domén a vzniká tak vlastní magnetické pole zmagetizovaného místa  $H_r$ . Po zrušení vnějšího magnetického pole brání některým doménám v návratu do původních poloh překážky ve struktuře, např. dislokace, a proto si materiál uchovává své magnetické vlastnosti, čímž vzniká remanentní polarizace  $I_r$ .



Obr. 7 Měření metodou magnetické skvrny. Vlevo magnetizace, vpravo měření, kde 1 je stěna feromagnetika, 3 je magnetizační cívka, A a B je snímač  $H_r$  [5]

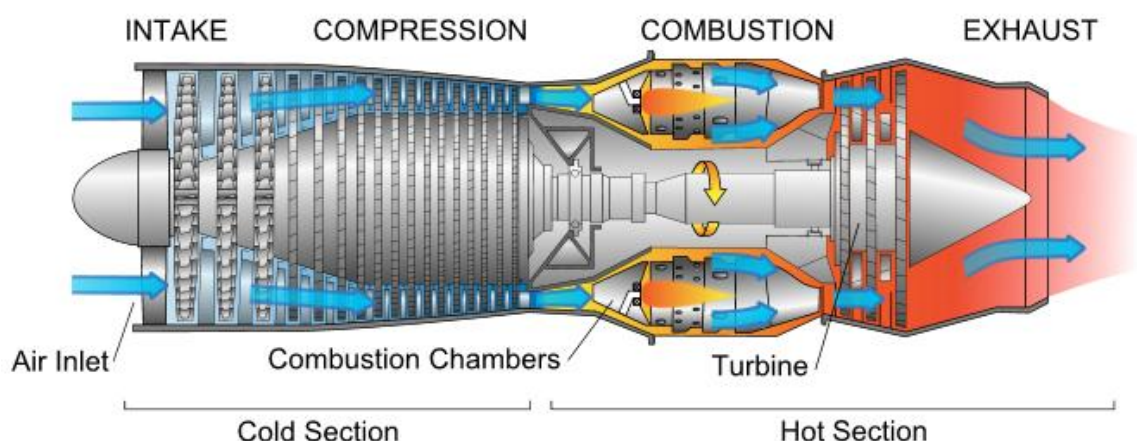
$$H_r = H_0 - N \cdot I_r / \mu \quad [\text{A/m}] \quad (7)$$

$H_r$	Intenzita remanentního magnetického pole	[A/m]
$H_0$	Intenzita magnetizačního pole	[A/m]
$N$	Demagnetizační činitel	[-]
$I_r$	Magnetická polarizace	[T]
$\mu$	Permeabilita	[H/m]

Princip metody spočívá v měření intenzity zbytkového pole  $H_r$  pod čelem Hallovi či Försterovi sondy. Hodnota  $H_r$  se následně zobrazí na displeji přístroje. Demagnetizační činitel  $N$  vypovídá o vnějších i strukturních geometrických poměrech rozhraní feromagnetika. Vliv jednotlivých zrn na výslednou hodnotu  $H_r$  je závislý na stínícím účinku a na jejich vzdálenosti od snímače. S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na  $H_r$ . Nastavení strukturoskopu se provádí podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole  $H$  [4, 5, 6, 7].

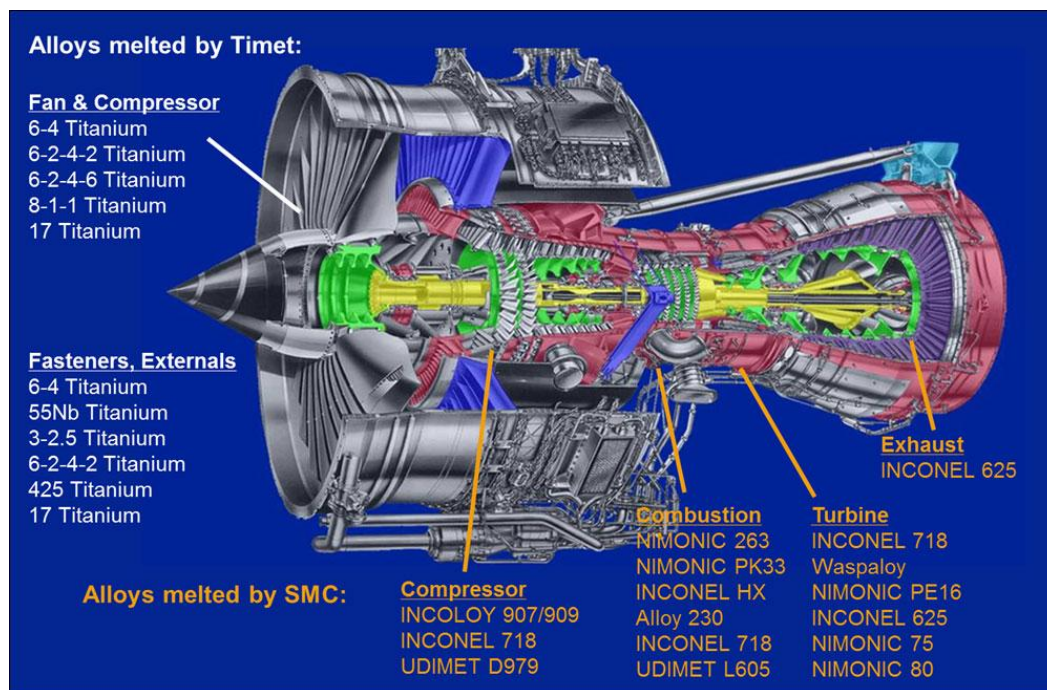
## 2.2 Lopatkové stroje

Diplomová práce se zabývá nedestruktivním měřením tloušťek lopatek plynových turbín. Plynové turbíny jsou tepelné motory, které společně s turbínami parními spadají mezi lopatkové stroje. Dále lze plynové turbíny a parní turbíny začlenit mezi turbíny tepelné, jejichž hlavním znakem je expanze pracovního plynu z vyššího do nižšího tlaku. Při této expanzi dochází k přeměně tepelné energie obsažené v pracovní látce procházející turbínou na energii mechanickou. V případě plynových turbín jsou pracovní látkou ohřáté plyny či spaliny, které se vytvářejí ve spalovací komoře. Plynová turbína ve spojení se spalovací komorou tvoří spalovací turbínu. Plynová turbína bývá rovněž ve spojení s kompresorem, který je poháněn turbínou. Kompresor nasává a stlačuje okolní vzduch. Stlačený vzduch je dále předehříván a mísen s plynule vstříkovaným palivem ve spalovací komoře, kde spalování paliva probíhá kontinuálně. Vzniklý horký plyn se spaliny proudí velkou rychlostí na lopatky turbíny, které tím roztáčí [8, 9].



Obr. 8 Schéma plynové turbíny [10]

Plynové turbíny nacházejí uplatnění v energetice a u pohonů velkých dopravních strojů – lodě, letadla.



Obr. 9 Materiály použité u plynové turbíny v proudovém motoru [11]

Nejčastěji užívané materiály používané u plynových turbín jsou žáruvzdorné a žáropevné slitiny titanu, niklu a kobaltu. Dále to mohou být materiály intermetalické, keramické či kompozitní [8, 9].

## 2.3 Slitiny niklu a kobaltu

### Slitiny niklu

Nikl je drahý, amorfní a feromagnetický kov s měrnou hmotností  $8,90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a teplotou tání  $1453^\circ\text{C}$ . Nadpoloviční většinu veškeré spotřeby niklu představují přísady do slitinových ocelí (60%), asi 15% celkové spotřeby niklu jsou polotovary (plechy, tyče, trubky) a zbylých 25% zastupují niklové slitiny [NMII].

Slitiny niklu jsou materiálem s vysokou odolností proti korozi, vysokým elektrickým odporem, vysokou pevností, žáropevností a houževnatostí. Jejich rozdělení se obvykle uvádí podle použití na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a na slitiny žáruvzdorné a žáropevné [12].

## **Konstrukční slitiny niklu**

Slitiny Ni-Cu, známé též jako monely, mají vysokou odolnost proti korozi. Typická slitina Ni-Cu – UNS NO4400 obsahuje 63% Ni, 28-34% Cu a maximálně 2% Mn a 2,5% Fe. Běžně jsou používány v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu, pro lopatky turbín a součásti čerpadel. Z důvodu dobré tepelné vodivosti Ni-Cu slitin jsou také tyto slitiny používány v tepelných výměnících, kde je mořská voda jednou z kapalin.

Slitiny Ni-Be s obsahem Be do 2% dosahují po vytvrzení pevnosti až 1800 MPa při dobré houževnatosti. Jsou vhodné do 500°C pro pružiny, membrány a trysky.

Slitiny Ni-Mn jsou odolné korozi i za vyšších teplot v prostředí obsahujícím sirné sloučeniny. Své uplatnění nacházejí např. u elektrod zapalovacích svíček.

Slitiny Ni-Mo jsou používány pro aplikace odlitků odolávající koroznímu působení kyseliny solné a chloridů [12, 13].

## **Slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi**

Termočláňkové slitiny Ni-Cr (Cr 9 až 12 hmot. %), známé též jako chromel, tvoří společně s niklovou slitinou alamel termočlánek pro teplotní rozsah 300 až 1000°C.

Odporové slitiny Ni-Cr (Cr 20 hmot. %), nazývané též jako nichrom a chromnikl jsou používány pro topné odpory do 1150°C.

Magneticky měkké slitiny jsou označovány i jako permalloy. Společně s niklem obsahují 22 až 64 hmot. % Fe. Tento materiál je používán pro jádra transformátorů měřících zařízení a přístrojů. Vysoké ceny takových výrobků jsou dané nutností použití velmi čistých komponent a náročnou výrobní technologií [12].

## **Žárovzdorné a žárupevné slitiny niklu**

Žárovzdorné a žárupevné slitiny niklu jsou často označovány i jako superslitiny niklu. Pojem superslitiny se koncem 50. let minulého století vžil pro označení komplexně legovaných materiálů na bázi Fe, Ni nebo Co, užívaných zejména pro výrobu nejvíce namáhaných žárových částí plynových turbín a turbodmychadel. Základními požadavky kladenými na tyto materiály jsou:

- odolnost proti komplexním mechanismům poškozování vlivem mechanického namáhání za vysokých teplot
- odolnost proti korozním účinkům pracovního média
- vyhovující technologické vlastnosti

Superslitiny se vzhledem ke svému strategickému významu, zejména v letectví, staly nejprozkoumanější skupinou kovových materiálů. Z tohoto důvodu lze v současné době vylepšovat vlastnosti superslitin hlavně kontrolou čistoty, či mikrolegováním, jelikož možnosti optimalizace kombinace legujících prvků jsou již do značné míry vyčerpány [14, 15].

Základní prvek superslitin – nikl, tvoří s přísadovými prvky základní matici  $\gamma$  s kubickou plošně středěnou mřížkou. Tato matrice se leguje dalšími prvky jako Co, Cr, Mo a W.

Niklové superslitiny jsou substitučně nebo precipitačně zpevněné. Dle tohoto se dělí na žárovzdorné a žárupevné.

## **Žárovzdorné superslitiny niklu**

Žárovzdorné superslitiny niklu mají jako hlavní přísadový prvek zaručující žárovzdornost chrom a jeho obsah bývá v rozmezí 15 – 30 hmot. %. Tyto slitiny jsou na bázi Ni-Cr a Ni-Cr-Fe, přičemž obsah Fe v ternární bázi bývá až 20 hmot. %. Nikl s chromem tvoří soustavu s úplnou rozpustností v tuhém stavu. Struktura žárovzdorných superslitin je zpevněna pouze substitučně a toto zpevnění zaručuje odolnost vůči korozi za vysokých teplot až 1150°C. Tyto slitiny však nejsou vhodné pro použití v mechanicky exponovaných aplikacích, protože za vyšších teplot dochází u těchto slitin k nebezpečnému tečení slitiny.



## Žárupevné superslitiny niklu

Žárupevné superslitiny niklu jsou rovněž založeny na bázi tuhého roztoku Ni-Cr. Důležitými přísadovými prvky jsou Al a Ti. Hliník tvoří sloučeninu  $\text{Ni}_3\text{Al}$  a titan sloučeninu  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ . Společně však tvoří precipitační vytvrzující fázi  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ , kterou lze považovat za tuhý roztok titanu ve sloučenině  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , a označuje se symbolem  $\gamma'$ . Žárupevnost je podmíněna přítomností jemných precipitátů  $\gamma'$ . S objemovým procentem roste žárupevnost, současně se však zhoršuje tvárnost. Dalšími přísadovými prvky jsou Mo, W, Nb, ty však zpevňují niklovou matici substitučně. Svůj podíl na žárupevnosti má i disperze karbidů, jež lze získat vhodným tepelným zpracováním. Dosahuje se tak karbidických fází  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_7\text{C}_3$  či  $\text{M}_6\text{C}$  podél hranic, kde tvoří překážku proti pokluzům.

Žárupevné superslitiny niklu mohou být při mechanickém zatěžování vystaveny teplotám až  $950^\circ\text{C}$ . Slitiny bohatě legované Ti a Al mají již charakter kovokeramického materiálu a lze je tedy zpracovat pouze přesným litím [12, 15].

## Inconel 713 LC

Niklová slitina Inconel 713 LC je v tuzemsku dobře známá, je již využívána v konstrukcích částí turbodmychadel a plynových turbín a je i materiálem turbínových lopatek diskutovaných v této práci. Jedná se o precipitačně vytvrditelnou slitinu Ni, která je obvykle zpracovávána přesným litím metodou vytavitelného modelu. Jedná se o nízkouhlíkovou modifikaci slitiny Inconel 713 C. Objemový podíl zpevňující fáze  $\gamma'$  je 55 %.

Fyzikální vlastnosti slitiny Inconel 713 LC jsou následující. Měrná hmotnost slitiny je  $8010 \text{ kg/m}^3$ , předpokládané rozmezí likvidu a solidu je  $1288$  až  $1321^\circ\text{C}$ , modul pružnosti při pokojové teplotě je asi  $197 \text{ GPa}$  a slitina je použitelná do  $926^\circ\text{C}$ . Minimální hodnoty mechanických vlastností za pokojové teploty stanovené normou ASTM jsou: mez pevnosti  $R_m = 895 \text{ MPa}$ , smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 750 \text{ MPa}$ , tvrdost  $310 - 410 \text{ HB}$  a tažnost  $A = 15\%$  [14,16]. Chemické složení je uvedeno v experimentální části práce.

## MAR-M 247

Druhou slitinou niklu vyskytující se v této práci je polykrystalická superslitina niklu MAR-M 247. Tato slitina je již více jak 4 desetiletí používána jako materiál pro turbínové lopatky a rotační části v leteckém průmyslu. Objemový podíl vytvrzující fáze je v porovnání s Inconelem 713 LC výrazně vyšší, a to 63 %. Přidáním hafnia do slitiny se optimalizují mechanické vlastnosti při vysokých teplotách. Hafnium především vstupuje do precipitátů  $\gamma'$  a zvyšuje jejich možné provozní teploty. Mechanické vlastnosti se uvádějí následující: mez pevnosti  $R_m = 827$  MPa, mez kluzu  $R_{p0,2} = 793$  MPa, tvrdost 408 HV a tažnost  $A = 6,5$  % [16]. Chemické složení je uvedeno v experimentální části práce.

## Slitiny kobaltu

Kobalt tvoří žárupevné slitiny, slitiny s vysokou tvrdostí a slitiny magneticky tvrdé společně s kovy jemu blízkými v periodické tabulce (Cr, Ni, Mo, W). Významné jsou především žárupevné slitiny kobaltu, které jsou určeny pro napětově nejvíce exponované součásti, jako jsou právě lopatky turbín. Slitiny kobaltu jsou tvořeny žáruvzdorným tuhým roztokem Co-Cr-Mo-Ni. U kobaltových slitin není dostatečně účinný mechanismus zpevnění precipitačním vytvrzováním sloučeninami s hliníkem a titanem, jako je tomu u slitin niklu. Jelikož se silně oxidační prvky Al a Ti u kobaltových slitin nepoužívají, výroba kobaltových slitin nevyžaduje nákladnou vakuovou technologii. U kobaltových slitin se uplatňuje pouze substituční mechanismus zpevnění matrice rozpuštěnými prvky a disperzním zpevněním malým obsahem hrubých částic karbidů. Kobaltové slitiny nahrazují slitiny niklu v aplikacích pracujících v agresivních prostředích (ropa, sodík) [12].

Slitiny kobaltu jsou v teoretické části uvedeny z důvodu jejich zařazení v zadání diplomové práce. Dodané turbínové lopatky pro experimentální část diplomové práce však byly dodány pouze ze slitin niklu, proto se slitinami kobaltu není více zabýváno.

## 3 Experimentální část

### 3.1 Úvod do experimentu

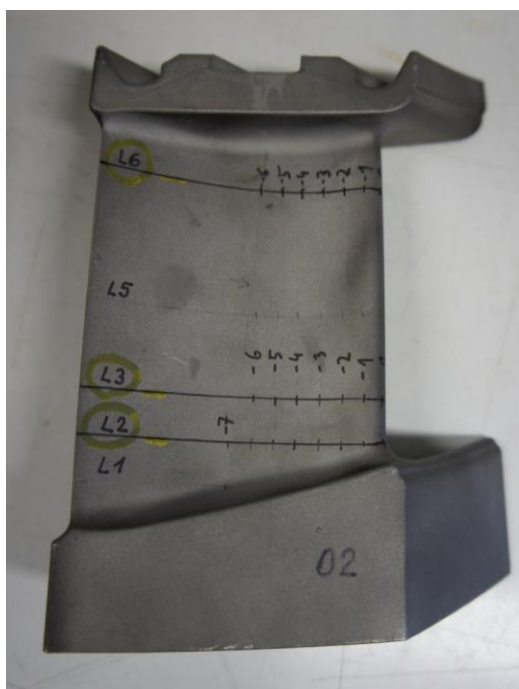
Experimentální část diplomové práce vychází z podmětu První brněnské strojírny Velká Bíteš, a.s., která si na katedře materiálu fakulty strojní, Technické univerzity v Liberci objednala měření profilu dutin a tloušťky stěn turbínových lopatek ultrazvukem. Jedná se o tři lopatky vyrobené přesným litím na vytavitelný model z žárupevných slitiny niklu. Pro potřeby této diplomové práce bylo zadání objednavatele rozšířeno o metodu vířivých proudů využitím přístroje Nortec 1000, o pokus s tloušťkoměrem NDT1 K5 a strukturoskopem Domena B3.b.

Přístroje NDT1 K5 a Domena B3.b ke své činnosti potřebují podklad z feromagnetického materiálu, čehož bylo dosaženo vyplněním chladících dutin lopatek feromagnetickými médii.

Na začátku experimentální části jsou představeny vzorky – turbínové lopatky, následuje představení použitých přístrojů, na což navazuje postup měření s naměřenými výsledky.

#### 3.1.1 Lopatka 02

Vzorek označený jako lopatka 02 je statorová lopatka plynové turbíny, která usměrňuje tok plynu na rotační lopatky.



Obr. 10,11 Lopatka 02

K lopatkám 02 a 05 bylo objednavatelem dodáno chemické složení. Jedná se o slitinu Inconel 713 LC.

Tab. 1 Chemické složení dodané objednavatelem – První brněnskou strojírnu Velká Bíteš, a.s.

Prvek	Min. hm. %	Max. hm. %
Uhlík	0,03	0,07
Mangan	-	0,25
Křemík	-	0,50
Fosfor	-	0,015
Síra	-	0,015
Chrom	11,00	13,00
Molybden	3,80	5,20
Niob	1,50	2,50
Titan	0,50	0,90
Hliník	5,50	6,50
Bor	0,005	0,015
Zirkon	0,05	0,15
Kobalt	-	1,00
Tantal	-	0,15
Železo	-	0,50
Měď	-	0,50
Nikl	zbytek	

Minimální hodnoty vlastností v tahu samostatně litých zkušebních tyček při 20°C

Tab. 2 Mechanické vlastnosti dodané objednavatelem

Vlastnost	Min. hodnota
<b>Tvrdost materiálu</b>	310 – 360 HB
<b>Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]</b>	689 (100 ksi)
<b>Pevnost v tahu Rm [MPa]</b>	758 (110 ksi)
<b>Tažnost ve 4D A4 [%]</b>	3.5
<b>Kontrakce Z [%]</b>	5

Naměřená hodnota tvrdosti je 336 HB.

Tab. 3 Měření chemického složení ručním XRF spektrometrem Bas Delta, Innov-X Systems Inc.

Vzorek	Cr	Ni	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	W	Ta	Al	Shoda
02	11,13	73,86	3,853	0,159	0,116	1,467	0,668			8,74	

### 3.1.2 Lopatka T40

Lopatka T40 je rotorová turbínová lopatka. U této lopatky nebylo známo chemické složení, což byl prvotní důvod k provedení XRF spektrální analýzy u všech lopatek a metalografického výbrusu u lopatky T40 a 05.



Obr. 12, 13 Lopatka T40

Tab. 4 Měření chemického složení ručním XRF spektrometrem Innov-X Systems Inc.

Vzorek	Cr	Ni	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	W	Ta	Al	Shoda
T40	7,77	61,17	0,639	0,213	10,6		0,788	10,84	2,03	5,96	MarM247

Měření chemického složení ručním XRF spektrometrem Innov-X Systems Inc. prokázalo, že se jedná o superslitinu niklu MarM247. Naměřená tvrdost má hodnotu 413 HV.

Metalografické vzorky byly připraveny z výřezů lopatek T 40 a 05. Vzorky byly vybroušeny a naleptány leptadlem Willela Bain, které je primárně určené na austenitické oceli. Na obou lopatkách byla objevena primární licí dendritická stavba odlitku překrytá hrubými zrny niklového austenitu v poli karbidů. Na fotografiích při 550 násobném zvětšení je možné spatřit hranice zrn tvořené kompaktní vrstvou karbidů či intermetalických sloučenin, které způsobují velký akustický odpor. Fotografie mikrostruktur jsou pořízené fotoaparátem Nikon Coolpix 4500 na mikroskopu Neophot 2.



Obr. 14 Metalografický výbrus z lopatky T40



*Obr. 15, 16 Mikrosnímky lopatky T40, vlevo 100 násobné zvětšení – dendritická struktura, vpravo 550 násobné zvětšení se zobrazením hranic zrn*

Fotografie makrostruktur pořízená na USB mikroskopu zobrazují kolmou orientaci dendritů k povrchu, a hrubá zrna.



*Obr. 17, 18 Makrosnímky struktury lopatka T40 – kolmá orientace dendritů, 30 násobné zvětšení*



### 3.1.3 Lopatka 05

Lopatka 05 je rotorová lopatka určená pro plynovou turbínu a je rovněž jako lopatka 02 z Inconelu 713 LC. Lopatka 05 byla dodaná jako vzorek neshodný, kde příčina neshody spočívá v nepřipustném natočení dutiny, k němuž došlo nežádoucím pootočením jádra formy při odlévání.



Obr. 19, 20 Lopatka 05

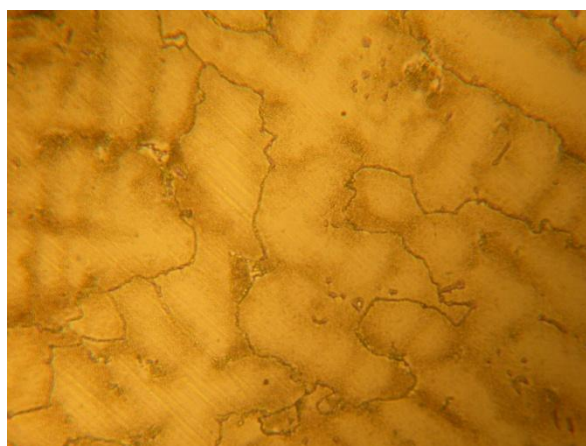
Tab. 5 Měření chemického složení ručním XRF spektrometrem Innov-X Systems Inc.

Vzorek	Cr	Ni	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	W	Ta	Al	Shoda
05	11,24	73,44	3,833	0,124	0,1	1,465	0,623			9,18	





*Obr. 21 Metalografický výbrus z lopatky 05*



*Obr. 22, 23 Mikrosnímky lopatky 05, vlevo 100 násobné zvětšení – dendritická struktura, vpravo 550 násobné zvětšení se zobrazením hranic zrn*



*Obr. 24 Snímek makrostruktury lopatky 05 – kolmá orientace dendritů, 20 násobné zvětšení*

#### **Pomocná média pro měření přístroji NDT1 K5 a DOMENA B3.b**

Materiály lopatek, v našem případě ze slitin niklu, jsou paramagnetické. Níže popsané přístroje NDT1 K5 a DOMENA B3.b však měří tloušťku stěny lopatky na základě vzdálenosti čela sondy od feromagnetického materiálu. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí vytvořit feromagnetický podklad. Feromagnetické vrstvy materiálu byly vytvořeny sybkými médii, kterými byly vyplněny dutiny měřených lopatek.

Jako feromagnetická média byly použity ocelové tryskácké kuličky (broky), drobné špony z litiny 422425 vzniklé při broušení za sucha a nakonec velice jemné špony z oceli 13 240.6 získané jako separát z magnetického separátoru (dále jen pěna).



*Obr. 25 Dutina lopatky 05 vyplněna ocelovými tryskacími kuličkami*

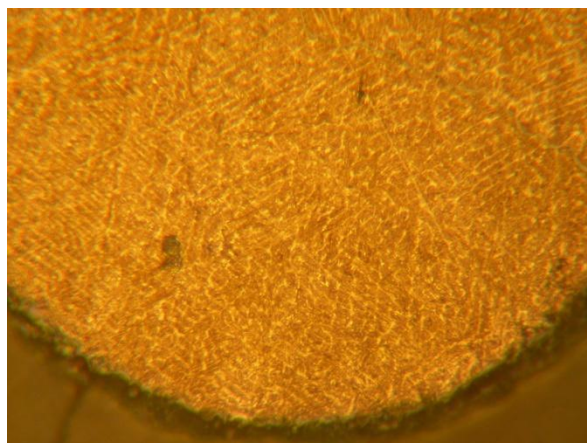
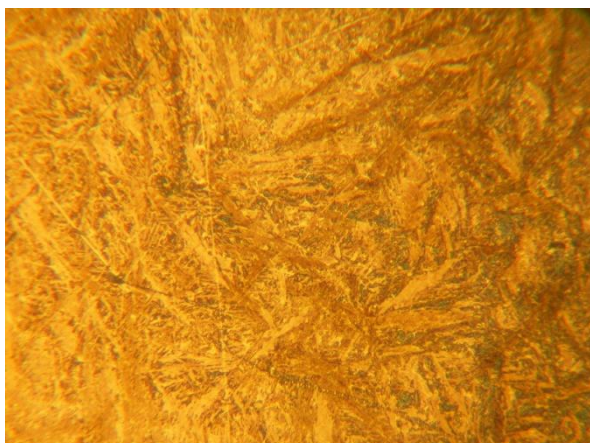
Tryskací kuličky jsou jediné médium, u kterého jsme původně neznali složení materiálu. Z tohoto důvodu byla provedena RTG spektrální analýza a metalografický výbrus.

*Tab. 6 Měření chemického složení ručním XRF spektrometrem Bas Delta, Innov-X Systems Inc.*

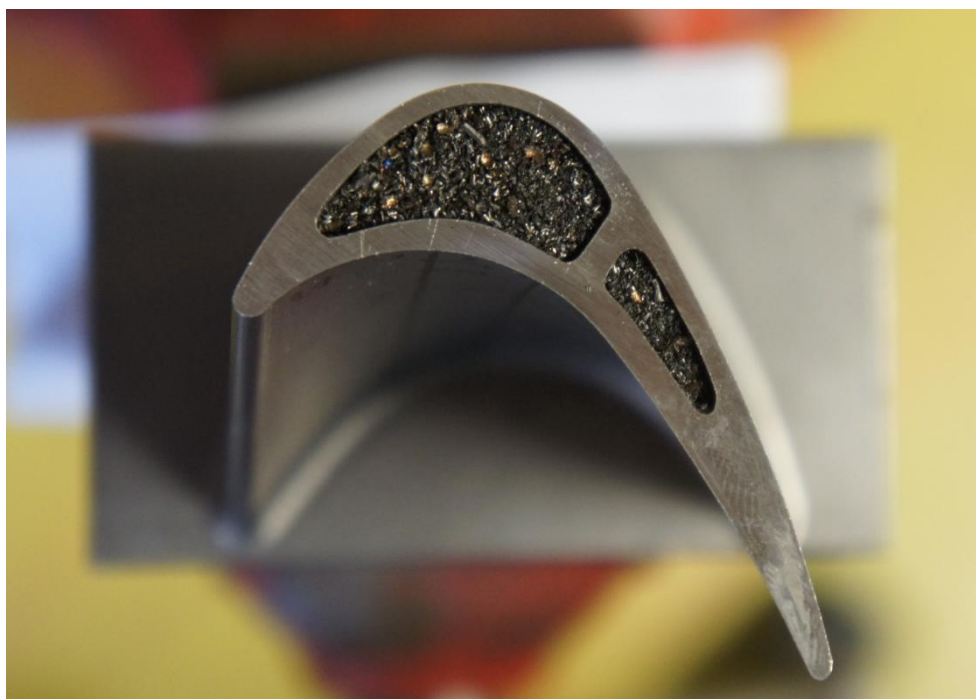
Vzorek	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	Si	P	S	Shoda
kuličky	0,162	0,149	0,031	0,549	92,96	0,855	0,093	0,78	4,317	0,019	0,088	

Z metalografického výbrusu vyplynulo, že směs kuliček je tvořena kuličkami ze dvou materiálů. Prvním materiálem je podeutektická ocel s bainitickou strukturou o tvrdosti 370 - 420 HV. Zbýlá část kuliček je z vysokouhlíkové oceli s dendritickou licí stavbou, kdy hranice dendritů tvoří karbidy s tvrdostí 470 - 490 HV a s jemným bainitem v dendritech.

Metalografický výbrus ukazuje na existenci dvou různých materiálů kuliček. Ohledně chemického složení získané XRF spektrometrem se dá hovořit o získání integrálního chemického složení ze zóny zasažené budícím paprskem spektrometru. XRF spektrometr rovněž nestanoví podíly lehkých prvků v materiálu.



*Obr. 26, 27 Metalografický výbrus tryskacích kuliček – vlevo bainitická struktura podeutoktoidní oceli, vpravo dendritická struktura vysokouhlíkové oceli.*



*Obr. 28 Dutina lopatky T40 vyplněna šponami z litiny 422425*

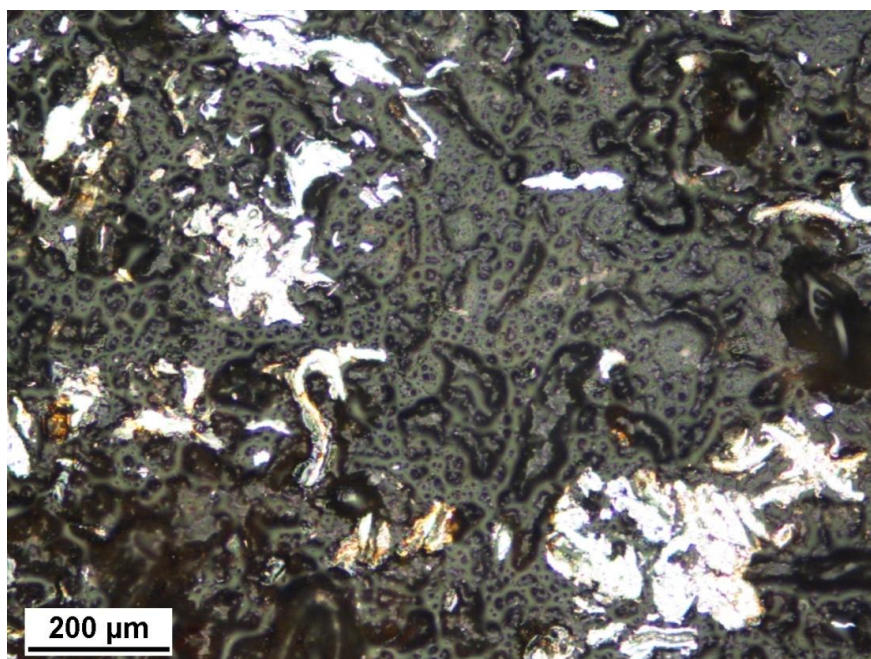




*Obr. 29 Dutina lopatky 05 vyplněna separátem z oceli 13 240.6 – „pěna“*

U všech médií byla sestavena kalibrační křivka pomocí plastových kalibračních měrek. Již při této kalibraci vznikly určité nepřesnosti, kde by bylo zapotřebí mít přesně definované měrky z materiálu měřeného vzorku. Média se liší materiálem, velikostí, tvarem a tudíž i různou obtížností manipulace. Nejjednodušší manipulace je s tryskacími kuličkami, jejichž průměr je 0,8 – 1 mm. Podobně snadná manipulace je se suchými šponami. Manipulace s pěnou je naopak velice složitá. Pěna má značnou tvarovou paměť a samovolně nevyplňuje určený prostor. Z tohoto důvodu s ní není možné vyplnit uzavřené dutiny a z tohoto důvodu byl experiment s tímto médiem proveden pouze u jedné lopatky (lopátka 05) s nejlépe přístupnou dutinou.

Médium námi nazývané jako pěna je směs malých špon z oceli 13 240.6, brusiva, pojiva brusiva a chladicí emulze. Pro získání představy o tomto médiu byl rovněž zhotoven metalografický výbrus, z kterého lze vypožorovat velikost ocelových špon řádově v desetinách milimetru a jejich nespojitě rozmístění ve směsi. Z této skutečnosti vyplívá otázka, jestli jsou tyto špony vodivě propojeny, či je toto médium vodivé pouze separátně.



*Obr. 30 Disperze „pěny“*

Jako čtvrté médium se zkoušel velice jemný prášek, který je primárně určen pro metodu nedestruktivního zkoušení a to pro práškovou magnetickou metodu. Toto médium je silně feromagnetické, avšak neprokázalo dostatečnou elektrickou vodivost k vytvoření vířivých proudů a proto měření s přístrojem NDT1 nevedlo k žádným výsledkům. S takto jemným médiem se také velice špatně manipuluje a médium se rovněž vyznačuje zvýšenou prašností, před kterou by bylo nutné chránit pracovníky ochrannými pomůckami.

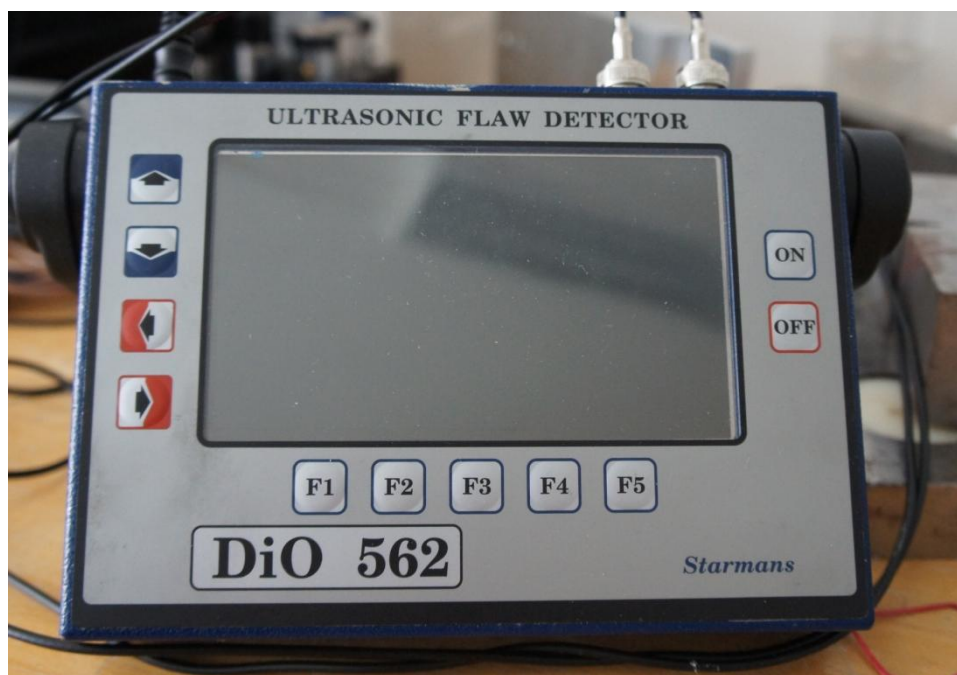


*Obr. 31 Dutina lopatky 05 vyplněna jemným práškem*

## 3.2 Použité zařízení a postup měření

### 3.2.1 Dio 562 LC

Digitální přístroj DIO 562 LC od české společnosti Starmans je přenosný ultrazvukový defektoskop. Tento přístroj je použitelný v široké škále aplikací ať už ve vnitřním či venkovním prostředí. Defektoskopem DIO 562 můžeme provádět měření tloušťky, jakož i detekovat vnitřní vady.



*Obr. 32 Defektoskop Dio 562*

K měření jsme použili bodovou sondu Olympus Parametric V260 RM s frekvencí 15 MHz. Zmíněná sonda je osazena plastovou předsádkou s velikostí hrotu 3 mm, která je s piezoelektrickými kontakty spojena vazebním prostředím - vodivým gelem. Sonda je určena pro ruční měření tvarově složitých vzorků. Dostatečnou rozlišitelnost (1%) požadovanou zadavatelem - První brněnskou strojírnou - v odečítání malých délek (tloušťek) lze dosáhnout jen vyššími frekvencemi.



*Obr. 33 Ultrazvuková sonda Olympus Parametric V260-RM [3]*

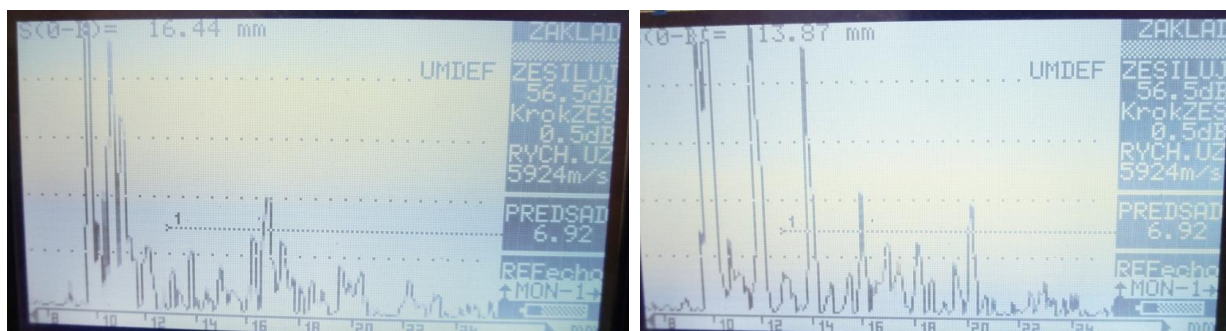
Pro měření tloušťky stěny ultrazvukem jsme použili odrazovou metodu, protože je možný přístup ke stěně lopatky pouze z venkovní strany. Použité byly tedy sondy jednoměničové, které slouží zároveň jako vysílač i přijímač. K měření tloušťek stěn byla použita již zmíněná kombinace ultrazvukového defektoskopu Starmans DIO 562 a bodové sondy Olympus Parametric V260-RM. Kalibrace sondy probíhala na ocelové měrce Unipan typ UG-4 (Polsko) s rychlostí zvuku 5920 m/s.



*Obr. 34 Kalibrační měrka Unipan typ UG-4*

Materiály vzorků se však liší od ocelové měrky nejen rychlostí zvuku, dle prospektu Olympus je rychlost zvuku v Inconelu 5820 m/s, ale i útlumem. Především útlum se u zkoušených lopatek zdá být poměrně vysoký. Zatímco při měření na oceli dostáváme úzká, výrazná a snadno čitelná opakovaná echa, při měření na vzorku z Inconelu taková echa nedostáváme.





Obr. 35,36 Porovnání ech získaných při měření na Inconelu (vlevo) a na ocelové měrce o podobné tloušťce (vpravo)

Na výše zmíněné kalibrační měrce z oceli a tloušťce 2 mm jsme pomocí 15 MHz sondy Olympus Parametric V260-RM zjistili koeficient útlumu  $\alpha$ :

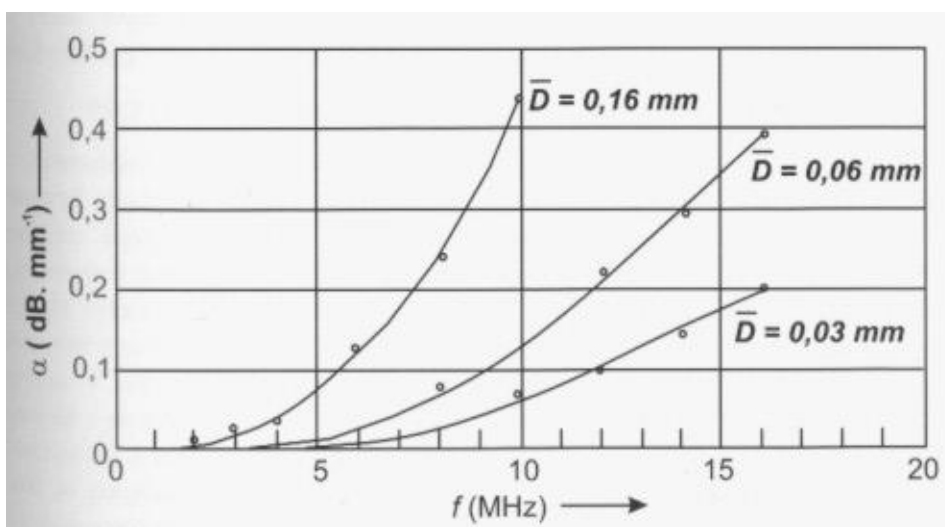
$$\alpha = \frac{k_2 - k_1}{2 \cdot d} \quad [\text{dB/mm}] \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{46,5 - 41}{2 \cdot 2} = 1,375 \text{ dB/mm} \quad (\text{viz. vzorec 8})$$

$k_1, k_2$  hodnoty prvního a druhého koncového echa [dB]

$d$  tloušťka materiálu [mm]

Tento útlum se jeví poměrně vysoký, je to dáno exponenciální závislostí útlumu na frekvenci.



Obr. 37 Závislost útlumu na frekvenci a velikosti zrna u uhlíkaté oceli [17]

Pro zjišťování rychlosti zvuku a útlumu v materiálu lopatek jsme tudíž použili 2 sondy s nižší frekvencí. Jsou to sondy Starmans - PQ 2/10-4C a PQ 2/10-2C. Jedná se o sondy přímé, dvouměničové, s průměrem měniče 10 mm a frekvencí 2 MHz u sondy PQ 2/10-2C a 4 MHz u sondy PQ 2/10-4C. Tímto způsobem jsme měřili lopatky T40 a 05.

#### Lopatka T40:

rychlost zvuku:

$$c = \frac{L}{L_u} \cdot c_u \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

$c_u$  rychlost zvuku nastavená v defektoskopu

$L$  skutečná tloušťka [mm]

$L_u$  tloušťka změřená ultrazvukem [mm]

$$c = \frac{18,45}{18,69} \cdot 5924 = 5847 \text{ m/s} \quad \text{při 4 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 9})$$

koeficient útlumu:

$$\alpha = \frac{k_2 - k_1}{2 \cdot d} = \frac{69,5 - 59,5}{2 \cdot 18,45} = 0,271 \text{ dB/mm} \quad \text{při 4 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 8})$$

$$\alpha = \frac{k_2 - k_1}{2 \cdot d} = \frac{67 - 57,2}{2 \cdot 18,32} = 0,267 \text{ dB/mm} \quad \text{při 2 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 8})$$

Hodnoty útlumu žárovevých niklových slitin jsou v porovnání s ocelí přibližně 5 krát větší.

Minimální použitelná frekvence je určena dle odhadnuté velikosti dendritů a hrubých zrn z makroskopických pohledů na výbrusy lopatek. Zmíněné dendrity a hrubá zrna tvoří překážku pro šíření ultrazvuku a jejich velikost by měla být menší, než je polovina zvolené vlnové délky. Velikost těchto útvarů byla určena až 2 mm, proto jsem do výpočtu za vlnovou délku volil víc jak dvojnásobnou hodnotu – a to 5 mm.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad [\text{Hz}] \quad (10)$$

$\lambda$  vlnová délka [m]

$c$  rychlost zvuku [m/s]

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{5847}{0,005} = 1,169 \text{ MHz} \quad (\text{viz. vzorec 10})$$

#### Lopatka 05:

rychlost zvuku:

$$c = \frac{L}{Lu} \cdot c_u = \frac{18,81}{18,62} \cdot 5924 = 5984 \text{ m/s} \quad \text{při 4 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 9})$$

koeficient útlumu:

$$\alpha = \frac{k_2 - k_1}{2 \cdot T} = \frac{68,5 - 585}{2 \cdot 18,45} = 0,269 \text{ dB/mm} \quad \text{při 4 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 8})$$

$$\alpha = \frac{k_2 - k_1}{2 \cdot T} = \frac{67 - 61}{2 \cdot 18,80} = 0,160 \text{ dB/mm} \quad \text{při 2 MHz} \quad (\text{viz. vzorec 8})$$

Minimální použitelná frekvence: velikost hrubých makroskopických útvarů až 1,5 mm, proto je vlnová délka zvolena 4 mm.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{5984}{0,004} = 1,496 \text{ MHz} \quad (\text{viz. vzorec 10})$$

Samotné měření tlouštěk lopatek probíhá v režimu 2, to znamená na první zpětné echo. Měření spočívá v nanesení vazebného prostřeku, v našem případě gelu, na zamýšlené místo měření. Následuje přiložení sondy, přičemž je sledován display a nastavovány parametry defektoskopu. Nastavení nuly se provádí předsádkou, nastavení rychlosti zvuku se provádí nastavením vzdáleností ech a echa, která mají být použita pro odečítání výsledku jsou vybírána bránou.

Použité nastavení přístroje je patrné z následující tabulky:

Tab. 7 Použité nastavení defektoskopu DIO 562

<b>Vysílač</b>	<b>NP + S VS, SP 93 n, počet 1</b>
<b>rozsah</b>	0,6 ms
<b>tlumení</b>	300 Ω
<b>filtr</b>	4 MHz
<b>detekce</b>	dvoucestná

### 3.2.2 Nortec 1000

Přístroj Nortec 1000 je univerzální přenosný vířivoproudý defektoskop navržený k detekci povrchových trhlin na železných i neželezných materiálech, dále ke kontrolám svarů, měření tloušťky, detekci koroze atp. Nastavení zesílení přístroje je možné od 0,0 do 90,0 dB a nastavuje se po 0,1 dB. Při maximálním zesílení – 90 dB a středním buzení sondy je citlivost přístroje 100 V/Ohm měřeno na 100 dílků obrazovky na Ohm na displeji. 10 dílků na displeji tedy představuje změnu impedance 0,1 Ohm. Frekvence je nastavitelná od 100 Hz do 6 MHz. Fázový úhel vířivoproudého signálu lze nastavit v rozmezí od 0 do 359°.



Obr. 38 Přístroj Nortec 1000

Pro měření tloušťky neželezných kovů je nezbytné zvolit dostatečně nízkou frekvenci, aby vířivé proudy mohli proniknout celou měřenou tloušťkou. Kritická tloušťka pro daný materiál je známá jako standardní hloubka vniku.

Standardní hloubka vniku pro námi použitou frekvenci 2 kHz v inconelu.

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = \frac{503,3}{\sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (11)$$

$$s = \frac{503,3}{\sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma}} = \frac{503,3}{\sqrt{2000 \cdot 1 \cdot 694444}} = 0,0135 \text{ m} \quad (\text{viz. vzorec 11})$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,44 \cdot 10^{-6}} = 694\,444 \text{ S/m} \quad (12)$$

$\rho$  pro Inconel 713 LC –  $1,44 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  [18]

s	standardní hloubka vniku	[m]
$\omega$	kruhová frekvence	[s <sup>-1</sup> ]
f	frekvence	[Hz]
$\sigma$	měrná elektrická vodivost	[S/m]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[H/m]
$\mu_r$	relativní permeabilita	[ - ]
$\rho$	rezistivita	[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]

Naše měření probíhalo při frekvenci 2 kHz a vertikální citlivosti 80 dB. Pointa měření je v zobrazování vektoru na displeji přístroje. Pomocí nastavení úhlu jsme si zobrazovaný vektor zobrazili jako skalár, čehož jsme dosáhli jeho srovnáním do svislé polohy. Odstranili jsme tím trigonometrii z odečítání, k čemuž přispěla i minimalizace horizontální citlivosti. Zobrazovaný koncový bod však je značně nestálý. Nestálost bodu při držení sondy na jednom místě byla až 10 dílků rastru za 10 s, což přičítáme možnému tepelnému ovlivnění sondy od prstů zkoušejícího. Naší domněnkou je, že přístroj postrádá vyrovnávání tepelných ovlivnění. Tento nedostatek by mohl kompenzovat držák sondy z tepelně nevodivého materiálu. Zmíněná nestálost zobrazovaných bodů je důvodem k výrazným nepřesnostem při odečítání výsledků a tudíž i k celkové nepřesnosti metody.

Použitá Sonda SL/1kHz – 50kHz je primárně určená k měření elektrické vodivosti a ke strukturoskopii. Toto je jediný druh sondy pro měření s nižšími frekvencemi. Tato sonda je však poměrně velká a má ploché čelo, jehož průměr je 8 mm. Tyto skutečnosti jsou poměrně limitující pro použití popisované sondy na dutých plochách, kde čelo sondy zcela nedoléhá na povrch zkoušeného vzorku. Sonden pro další využití metody vířivých proudů se vyznačují podstatně většími frekvencemi, ať už to jsou sondy pro měření tloušťek vrstev, či sondy pro zjišťování hledání trhlin.



*Obr. 39 Sonda SL/1kHz – 50kHz přístroje Nortec 1000*

Nortec 1000 udává naměřenou veličinu jako bod, či vektor na displeji, který se odečítá jako počet dílků displeje přístroje vůči naměřené hodnotě „nekonečně“ silného materiálu. Výsledky zobrazené na displeji lze interpretovat jako převedené napětí indikované na cívce sondy v našem případě na svislou složku na displeji.



*Obr. 40 Měření přístrojem Nortec 1000*

### **Vliv křivosti stěny při měření přístrojem Nortec 1000**

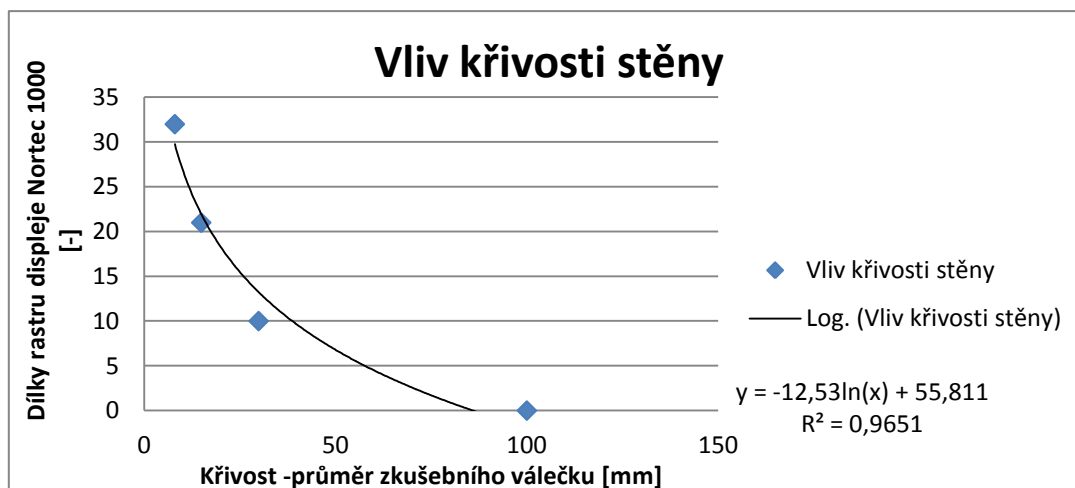
Domněnka o vlivu křivosti na výsledné hodnoty byla potvrzena následujícím pokusem, kdy bylo provedeno měření na sadě ocelových válečků z materiálu 12060.1. Měření proběhlo na třech průměrech a bylo porovnáno s hodnotou naměřenou na rovné ploše.



*Obr. 41 Ocelové válečky - 12060.1 pro měření vlivu křivosti stěny*

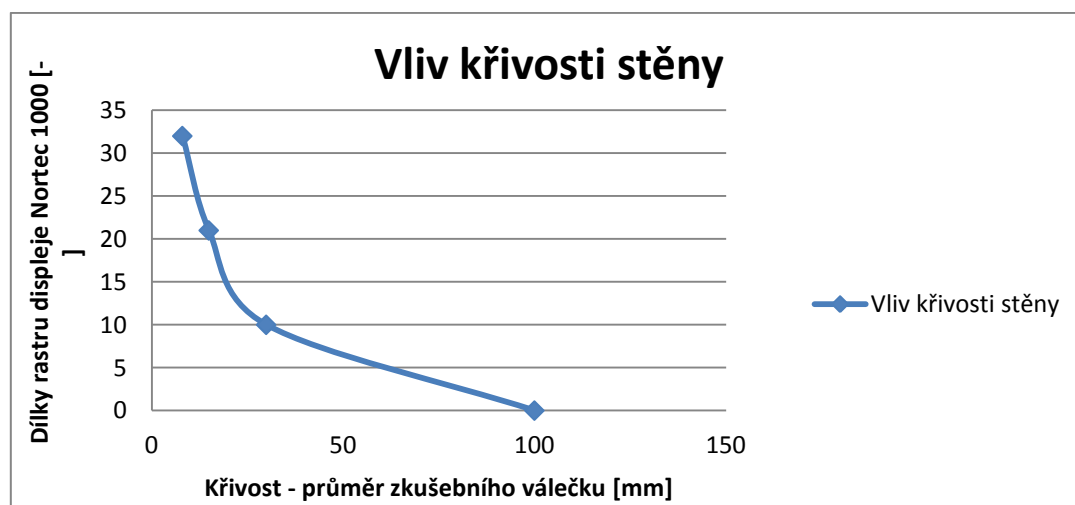
Tab. 8 Vliv křivosti stěny na naměřené hodnoty

Průměr válečku	Počet dílků rastru displeje [-]
∞ plocha	0
ø 29,9 mm	10
ø 14,9 mm	21
ø 8 mm	32



Graf. 1 Vliv křivosti stěny při měření přístrojem Nortec 1000

Z důvodu malého počtu testovacích válečků a tudíž malého počtu naměřených hodnot nebylo možno sestavit dostatečně vypovídající křivku. MS Excel nedokáže lépe proložit matematickým modelem naměřené hodnoty. Z tohoto důvodu je přiložen ještě graf spojnicový, na kterém je závislost vidět zřetelněji.



Graf. 2 Vliv křivosti stěny při měření přístrojem Nortec 1000



### 3.2.3 NDT1 Kraft K5

Tloušťkoměr NDT1 K5 je multifunkční přenosný přístroj určený k měření tloušťek všech typů povlaků, který je vybaven samostatnými vyměnitelnými sondami. S přístrojem lze měřit dielektrické a galvanické povlaky na ocelovém podkladu, dielektrické i vodivé povlaky na neferomagnetickém podkladu, drsnost povrchu, teplotu a vlhkost okolí. K nedestruktivnímu měření tloušťky využívá přístroj NDT1 K5 magneto-indukční metody, parametrické metody vířivých proudů a fázové vířivoproudé metody. K našemu pokusu měření tloušťky stěny turbínových lopatek jsme využili sondy F3, která využívá magneto-indukční metody a je určena k měření dielektrických a vodivých neferomagnetických povlaků na feromagnetickém podkladu. Sonda obsahuje pružinový měřicí systém a je určena k měření až 5 mm silných povlaků. Sonda obsahuje citlivý prvek a vestavěnou energeticky nezávislou paměť, která slouží k ukládání výchozí kalibrační charakteristiky a parametrů poslední kalibrace. Výchozí kalibrační charakteristiku ukládá do paměti přístroje výrobce pomocí snímání na vzorovém podkladu z oceli. Parametry poslední kalibrace (aditivní a multiplikativní koeficient) jsou definovány na konkrétním vzorku skutečného výrobku bez povlaku [19].



Obr. 42 Tloušťkoměr NDT1 K5 [19]



Obr. 43 Sonda F3 tloušťkoměru NDT1 K5 [19]

### Měření přístrojem NDT1 K5

Měření spočívá v přiložení sondy na měřený bod, přitisknutím a vyčkáním na stabilizaci hodnoty tloušťky, která je signalizována zvukovým signálem. Pro přiblížení k metodě měření neferomagnetických vrstev na feromagnetickém podkladu byla do dutin lopatek umístěna feromagnetická média.

Přístroj NDT1 K5 je od výrobce kalibrován na ocelovém kalibru. Jelikož jsme používali reálná média z rozdílného materiálu než je ocelový kalibr, bylo nezbytné sestavení korekčních křivek pro všechna média. Korekční křivky byly sestaveny po sérii měření na jednotlivých médiích s pomocí plastových měrek definovaného rozměru na cca 5 mm silné vrstvě média.

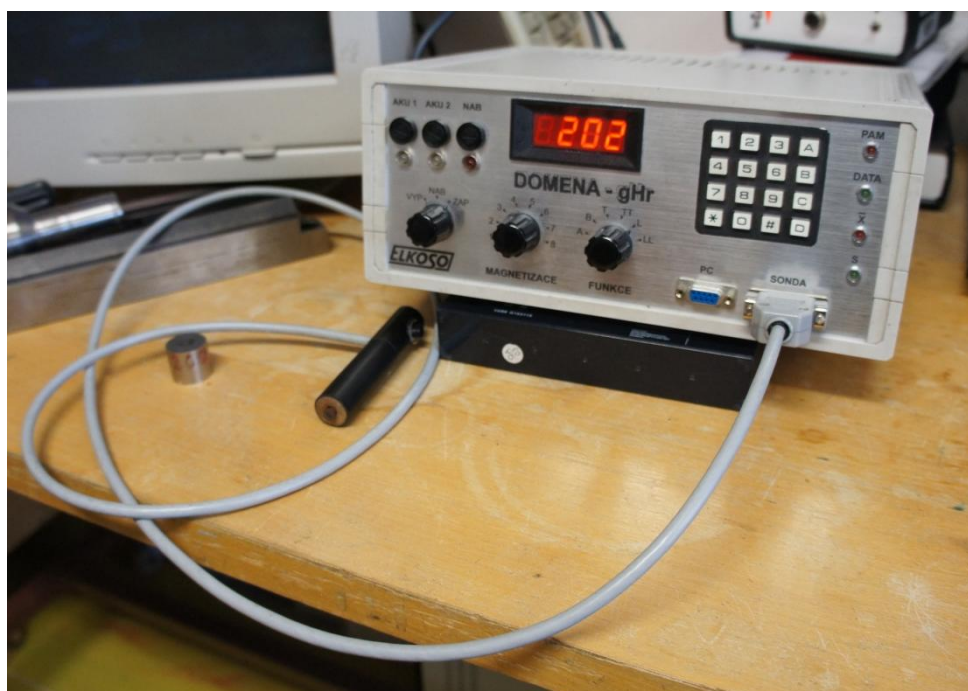
Tab. 9 Korekce na jednotlivých médiích přístroje NDT1

Měrka [mm]	Kalibr NDT1	Kuličky [mm]	Suché litinové špony [mm]	Vlhké litinové špony [mm]	Pěna [mm]
0,508		0,987	1,54	1,45	1,82
0,989	0,995	1,46	2,12	2,07	2,60
1,92	1,93	2,38	3,30	3,27	3,94
2,91	2,92	3,44	4,70	4,60	5,35
Rovnice regrese	$y = 0,9979x - 0,0047$	$y = 0,9804x - 0,4445$	$y = 0,7596x - 0,6324$	$y = 0,7632x - 0,5915$	$y = 0,684x - 0,7626$
Spolehlivost	$R^2 = 1$	$R^2 = 0,9995$	$R^2 = 0,9989$	$R^2 = 0,9999$	$R^2 = 0,9995$

Příslušné korekční křivky jsou součástí přílohy.

### 3.2.4 DOMENA B3.b

Přístroj DOMENA B3.b je přenosný, bateriově napájený magnetický strukturuometr z produkce brněnské společnosti ELKOSO s.r.o. Strukturuometr DOMENA B3.b se skládá z vlastního přístroje a příložené sondy. Vlastní přístroj je umístěn v ochranném obalu s čelním panelem. Na čelním panelu je umístěno ovládání přístroje a displej ukazující naměřené hodnoty. Pomocí kalibrace přístroje, přepínače funkcí a indikátoru stavu lze dosáhnout toho, abychom na displeji dostali hodnotu přímo v konkrétních jednotkách. Přístroj DOMENA B3.b umožňuje propojení s počítačem, kalibraci podle etalonů uživatele, jakož i výpočet statistických údajů z hodnot uložených v paměti přístroje. Hlavní ovládací panel je pro ovládání přístroje osazen přepínačem akumulátorového zdroje VYP/NAB/ZAP se dvěma indikačními světly a jedním dvojitým světlem, přepínačem velikosti magnetizace v osmi stupních, přepínačem funkce s možnými funkcemi A, B, T, TT, L a LL, čtyřmístným LED displejem, klávesnicí s 12 tlačítky a indikačními světly PAM, DATA, x, s. Pro lepší komfort měření je tlačítka START umístěna přímo na sondě. Dále je přístroj osazen konektorem SND pro kombinovanou sondu, konektorem pro připojení k počítači a konektorem pro připojení nabíječky.

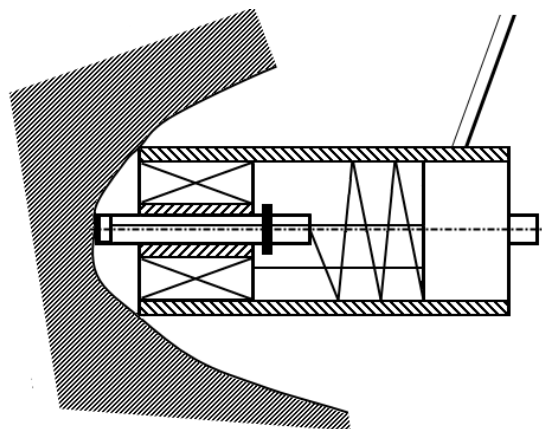


*Obr. 44 Přístroj DOMENA B3.b*

Přístroj DOMENA B3.b se vyznačuje jednoduchou obsluhou, bezúdržbovostí a možností využití i v hromadné výrobě díky rychlému měření, které se řádově pohybuje v sekundách. Příložnou sondu lze také konstruovat dle požadavků konkrétního místa zkoušeného materiálu.

DOMENA B3.b je především určen k měření tvrdosti, pevnosti a hloubky prokalení, což jsou vlastnosti závislé na rozložení magneticky tvrdých strukturních fází jako je perlit, cementit či martenzit. Součástí této práce je pokus o aplikaci DOMENA B3.b na měření proměnlivých tloušťek stěn turbínových lopatek využitím efektu oddálení od feromagnetika.

Měřicí aparatura DOMENA B3.b byla vybavena sondou pro měření vydutých povrchů. Sonda je předmětem užitého vzoru UV 22605 a oproti běžným sondám se liší tím, že nemá ploché čelo. Hallova sonda, která slouží k snímání zbytkového magnetického pole na povrchu vzorku, je součástí pohyblivého prvku sondy, jež je vodivě a mechanicky spojen s obalem sondy pružinou.



*Obr. 45, 46 Sonda pro měření vydutých povrchů přístroje DOMENA B3.b (užitný vzor UV 22605)*

Postup měření přístrojem DOMENA B3.b je následující. Přístroj se zapíná otočením akumulátorového zdroje do polohy ZAP, načež následuje volba velikosti proudu přepínačem velikosti magnetizace. Kalibrace přístroje začíná otočením přepínače funkce do polohy T a zobrazením vnitřní konstanty „a“, která je přednastavena na hodnotu 1,00. Prostřednictvím klávesnice zadáme hodnotu kalibru do paměti přístroje a tento krok potvrdíme klávesou D. Následuje přiložení čela sondy na čelo kalibru z niklového bronzu a následné stisknutí tlačítka START na sondě. Správnou kalibraci přístroje kontrolujeme otočením přepínače funkce do pozice L a znovu provedeme měření přiložením sondy ke kalibru. Pokud se zobrazená hodnota pohybuje ve 2 % toleranci nastavené hodnoty, kalibrace je považována za vyhovující. V opačném případě je nezbytné kalibraci opakovat. Měření lze provádět na 3 magnetické pulzy (poloha přepínače funkce L), či na 5 pulzů (poloha LL).

Tab. 10 Korekce na jednotlivých médiích přístroje Domena

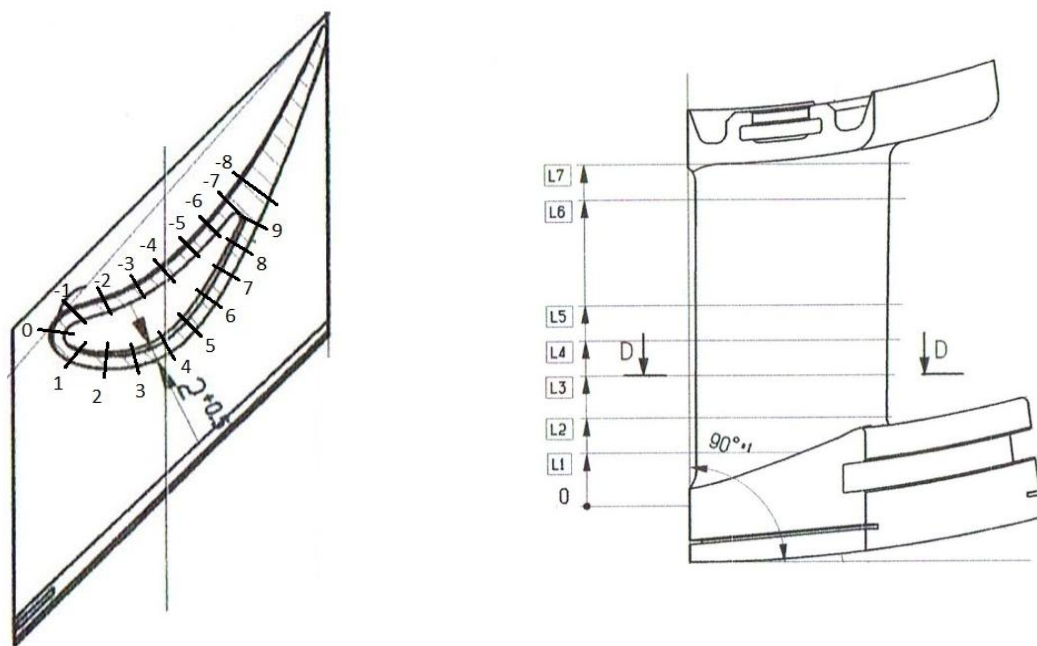
Měrka & oddálení sondy	Kalibr-Domena CuNi <sub>3</sub>	Kalibr F NDT1 - ocel	Kuličky	Špony	Pěna
<b>0</b>	200	76,4	200	200	100
	196	81	218	212	96,7
<b>0,125</b>	193	70,3	234		
	190	74,4	204		
<b>0,508</b>	133	64	180	891	1548
	134	67	163	867	1536
<b>0,989</b>	113	62	137	700	1274
	112	54	122	696	1268
<b>1,92</b>	61	38	79,3	469	890
	63	45	67,7	460	890
<b>2,91</b>	29,1	26	40,9	298	600
	28,4	31	39,5	295	594
<b>3,909</b>	11,2	19	25,5	190	392
	12,2	22,8	25,5	188	390
<b>4,84</b>				123	260
				122	256
<b>5,829</b>			10,7	78,1	168,8
			9,3	77,5	165,2
<b>Rovnice regrese</b>	$y = -1,408 \ln(x) + 7,5363$	$y = -2,883 \ln(x) + 12,595$	$y = 6,6471e^{-0,016x}$	$y = 7,2216e^{-0,003x}$	$y = 7,7325e^{-0,002x}$
<b>Spolehlivost</b>	$R^2 = 0,9915$	$R^2 = 0,9786$	$R^2 = 0,9598$	$R^2 = 0,9958$	$R^2 = 0,9931$

Korekční křivky jsou součástí příloh.

### 3.3 Výsledky měření

#### 3.3.1 Lopatka 02

Lopatka 02 je statorová lopatka plynové turbíny zhotovená ze slitiny niklu Inconel 713 LC. Tento vzorek byl proměřen ultrazvukovou metodou přístrojem Dio 562, tloušťkoměrem NDT1 K5, strukturoskopem Domena a strukturoskopem Nortec 1000. Jednotlivé výsledky jsou porovnány v souhrnné tabulce vždy na konci oddílu.



Obr. 47, 48 Rozložení měřených bodů na lopatce 02

Tab. 11 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky 02.

Lopatka 02, linie L6	Měrové středisko Zeiss	ultrazvuk-Dio562			NDT1 R5-F3-kuličky			NDT1 R5-F3-špony		
		hodnota	chyba		hod.	chyba		hod.	Chyba	
			rel.	abs.		rel.	abs.		rel.	abs.
-4	2,459	2,03	-17,45%	-0,43	2,53	2,73%	0,07	2,50	1,86%	0,05
-3	2,5423	2,21	-13,07%	-0,33	2,52	-1,02%	-0,03	2,55	0,32%	0,01
4	2,5568	2,58	0,91%	0,02	2,80	9,54%	0,24	2,84	11,04%	0,28
5	2,4463	2,95	20,59%	0,50	2,63	7,67%	0,19	2,68	9,53%	0,23
Ø odchylek hodnot			-2,25%	-0,06		4,73%	0,12		5,69%	0,14
maximální odchylka			20,59%	0,50		9,54%	0,24		11,04%	0,28
směrodatná odchylka			14,83%	0,37		4,15%	0,10		4,66%	0,12

Tab. 12 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky 02.

Lopatka 02, linie L6	Měrové středisko Zeiss	Domena-kuličky			Domena-špony			Nortec 5kHz
		hodnota	chyba		hodnota	chyba		
			rel.	abs.		rel.	abs.	
-4	2,459	3,62	47,12%	1,16	2,96	20,27%	0,50	15
-3	2,5423	4,03	58,37%	1,48	3,22	26,49%	0,67	20
4	2,5568	2,80	9,70%	0,25	2,36	-7,75%	-0,20	25
5	2,4463	2,94	20,26%	0,50	2,17	-11,33%	-0,28	25
Ø odchylek hodnot			33,86%	0,85		6,92%	0,17	
maximální odchylka			58,37%	1,48		26,49%	0,67	
směrodatná odchylka			19,66%	0,50		16,66%	0,42	

Tato lopatka má velice špatně přístupnou vnitřní dutinu, což je důvod, proč jsme měli k dispozici tak málo bodů změřených metrologickou metodou – měrovým střediskem Zeiss. U této lopatky bylo nejpřesnějších výsledků měření dosaženo tloušťkoměrem NDT1 K5 při použití kuliček jako pomocného feromagnetického média.

Výsledky měření ultrazvukovou metodou sice vykazují průměr odchylek výsledků metody pouze 2,25%, avšak hodnoty směrodatné odchylky 14,83% a maximální odchylky 20,59% naznačují, že vypovídající hodnota tohoto výsledku není příliš velká.

### 3.3.2 Lopatka T40

Druhým vzorkem je vzorek označený jako lopatka T40. Jedná se o rotorovou lopatku plynové turbíny zhotovené ze slitiny niklu MarM247. Tato lopatka byla podrobena měření tloušťkoměrem NDT1 K5 a strukturoskopem Domena. Hodnoty získané nedestruktivními metodami byly porovnány s hodnotami naměřenými posuvným měřítkem.

Tab. 13 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky T40.

Lopatka T 40	měřený bod	posuvné měřítko	NDT1 R5-F3-kuličky			NDT1 R5-F3-špony		
			hodnota	chyba		hodnota	chyba	
				rel.	abs.		rel.	abs.
<b>vnitřní</b>	-1	2,66	2,68	0,86%	0,023	2,53	-4,98%	-0,132
	-2	2,77	2,85	2,88%	0,080	2,56	-7,66%	-0,212
	-3	2,41	2,56	6,04%	0,146	2,61	8,34%	0,201
<b>vnější</b>	3	1,68	1,91	13,60%	0,228	1,97	17,44%	0,293
	4	1,62	1,74	7,52%	0,122	1,78	9,60%	0,156
	5	1,8	1,85	2,76%	0,050	1,81	0,33%	0,006
<b>Ø odchylek hodnot</b>				5,61%	0,108		3,85%	0,052
<b>maximální odchylka</b>				13,60%	0,228		17,44%	0,293
<b>směrodatná odchylka</b>				4,20%	0,068		8,76%	0,181



Tab. 14 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky T40.

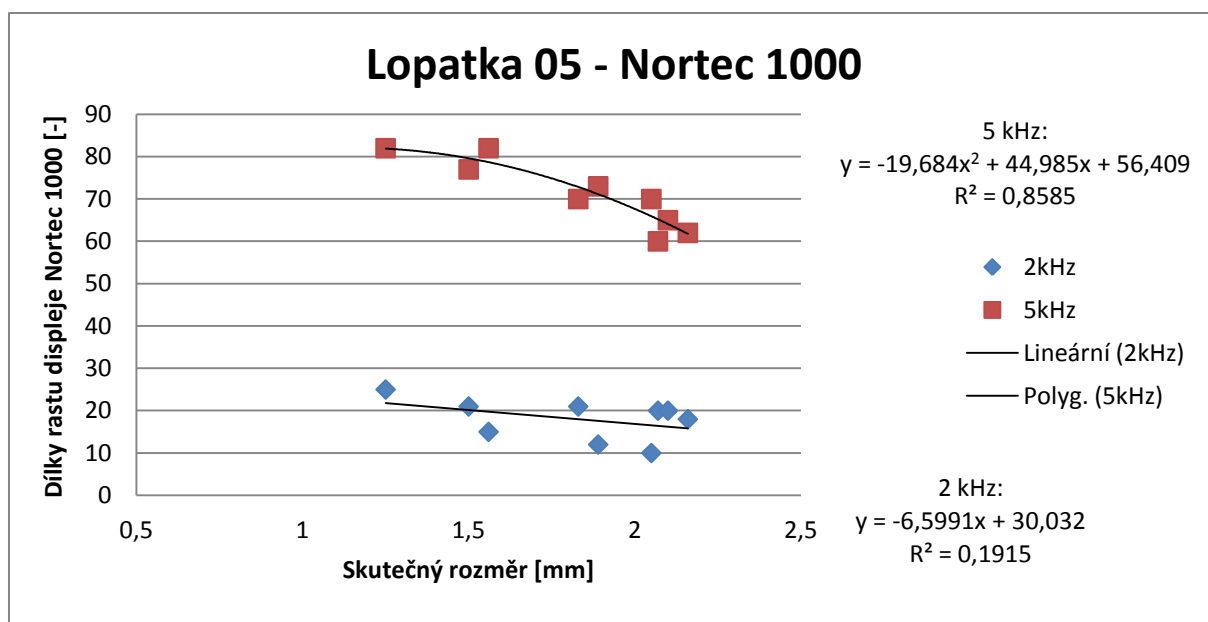
Lopatka T 40	měřený bod	posuvné měřítko	Domena-kuličky			Domena-špony		
			hodnota	chyba		hodnota	chyba	
				rel.	abs.		rel.	abs.
<b>vnitřní</b>	-1	2,66	4,65	74,76%	4,65	74,76%	4,65	74,76%
	-2	2,77	4,99	80,15%	4,99	80,15%	4,99	80,15%
	-3	2,41	4,44	84,07%	4,44	84,07%	4,44	84,07%
<b>vnější</b>	3	1,68	1,39	-17,20%	1,39	-17,20%	1,39	-17,20%
	4	1,62	1,37	-15,56%	1,37	-15,56%	1,37	-15,56%
	5	1,8	1,45	-19,38%	1,45	-19,38%	1,45	-19,38%
<b>Ø odchylek hodnot</b>				31,14%	0,89		32,84%	0,89
<b>maximální odchylka</b>				84,07%	2,22		76,55%	1,96
<b>směrodatná odchylka</b>				48,61%	1,19		41,04%	1,03

U lopatky T40 bylo dosaženo nejlepších výsledků při měření tloušťkoměrem NDT1 K5, kdy hodnoty průměru odchylek hodnot jednotlivých metod dosahoval 3,85% při použití špon a 5,61% při použití kuliček jako pomocného média.

### 3.3.3 Lopatka 05

Lopatka 05 je třetím měřeným vzorkem, na kterém proběhl největší počet měření z důvodu nejlepšího přístupu k chladicí dutině lopatky. Měření probíhalo tloušťkoměrem NDT1 K5, kde vedle vícekrát použitých pomocných médií – kuliček a špon, byly navíc provedeny pokusy s navlhčenými šponami a s velmi jemnými šponami námi nazývanými jako pěna. S těmito médii se velice špatně manipuluje, proto byla použita pouze u této lopatky s nejlépe přístupnou dutinou.

Dále tato lopatka byla měřena strukturoskopem Domena a strukturoskopem Nortec 1000. Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami naměřenými posuvným měřítkem.



Graf 3 Závislost naměřených hodnot přístrojem Nortec 1000 na tloušťce stěny

Tab. 15 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky 05.

Lopatka 05	bod	posuvné měřítko	NDT1 R5-F3-kuličky			NDT1 R5-F3-špony			NDT1 R5-F3-špony-vlhké		
			hodnota	chyba		hodnota	chyba		hodnota	chyba	
				rel.	abs.		rel.	abs.		rel.	abs.
Vnitřní	-4	2,05	1,96	-4,51%	-0,09	1,96	-4,50%	-0,09	2,06	0,68%	0,01
	-5	1,89	1,79	-5,25%	-0,10	1,75	-7,26%	-0,14	1,92	1,53%	0,03
	-6	1,56	1,45	-7,20%	-0,11	1,48	-5,17%	-0,08	1,56	0,06%	0,00
Vnější	5	2,07	2,58	24,40%	0,51	2,48	19,90%	0,41	2,68	29,23%	0,61
	6	2,16	2,46	13,77%	0,30	2,32	7,52%	0,16	2,55	18,19%	0,39
	7	2,1	2,37	12,82%	0,27	2,28	8,42%	0,18	2,47	17,57%	0,37
	8	1,83	2,08	13,93%	0,25	2,03	11,14%	0,20	1,84	0,71%	0,01
	9	1,5	1,75	16,77%	0,25	1,68	12,29%	0,18	1,96	30,53%	0,46
	10	1,25	1,51	20,52%	0,26	1,46	16,52%	0,21	1,66	32,96%	0,41
Ø odchylek hodnot				9,47%	0,17		6,54%	0,12		14,61%	0,25
maximální odchylka				24,40%	0,51		19,90%	0,41		32,96%	0,61
směrodatná odchylka				11,25%	0,21		9,35%	0,17		13,31%	0,22

Tab. 16 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky 05.

Lopatka 05	bod	posuvné měřítko	NDT1 R5-F3-pěna			Domena-kuličky			Domena-špony		
			hodnota	chyba		hodnota	chyba		hodnota	chyba	
				rel.	abs.		rel.	abs.		rel.	abs.
Vnitřní	-4	2,05	1,60	-21,75%	-0,45	3,59	75,05%	1,54	3,27	59,44%	1,22
	-5	1,89	1,49	-20,92%	-0,40	3,42	80,95%	1,53	2,94	55,36%	1,05
	-6	1,56	1,21	-22,17%	-0,35	2,68	71,96%	1,12	2,61	67,43%	1,05
Vnější	5	2,07	2,19	5,91%	0,12	2,50	20,95%	0,43	2,19	5,94%	0,12
	6	2,16	2,10	-2,62%	-0,06	2,46	13,75%	0,30	2,41	11,35%	0,25
	7	2,1	2,00	-4,73%	-0,10	2,15	2,21%	0,05	2,01	-4,17%	-0,09
	8	1,83	1,84	0,36%	0,01	2,05	11,93%	0,22	1,73	-5,45%	-0,10
	9	1,5	1,60	6,48%	0,10	1,48	-1,13%	-0,02	1,57	4,50%	0,07
	10	1,25	1,38	10,27%	0,13	1,01	-19,48%	-0,24	1,31	4,91%	0,06
Ø odchylek hodnot				-5,46%	-0,11		28,46%	0,55		22,15%	0,40
maximální odchylka				-22,17%	-0,45		80,95%	1,54		67,43%	1,22
směrodatná odchylka				12,23%	0,22		35,32%	0,64		27,86%	0,51

Tab. 17 Porovnání naměřených výsledků všech použitých metod u lopatky 05.

Lopatka 05	bod	pos. měř.	Domena-pěna			Nortec - 2kHz	Nortec - 5kHz
			hodnota	chyba			
				rel.	abs.		
Vnitřní	-4	2,05	2,64	28,92%	0,59	10	70
	-5	1,89	2,51	32,82%	0,62	12	73
	-6	1,56	1,97	26,36%	0,41	15	82
Vnější	5	2,07	1,74	-15,74%	-0,33	20	60
	6	2,16	1,67	-22,82%	-0,49	18	62
	7	2,1	1,37	-34,64%	-0,73	20	65
	8	1,83	1,14	-37,62%	-0,69	21	70
	9	1,5	0,83	-44,63%	-0,67	21	77
	10	1,25	0,68	-45,37%	-0,57	25	82
Ø odchylek hodnot				-12,52%	-0,21		
maximální odchylka				32,82%	0,62		
směrodatná odchylka				30,97%	0,54		

U lopatky 05 opět nejlépe dopadlo měření tloušťkoměrem NDT1 K5 s pomocným médiem šponami a dosaženým průměrem jednotlivých odchylek hodnot 6,54%.

## 4 Diskuze výsledků

V experimentální části diplomové práce jsou představeny výsledky měření, které jsme získali pomocí tří metod – metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny. Experiment prokázal možnost měření tloušťek turbínových lopatek všemi metodami avšak s rozdílnou úspěšností a aplikovatelností. Všechny metody používají ruční sondy a měření s těmito sondami probíhalo pouze s ručním přikládáním. Z použitých sond je velikostně vhodná sonda pouze použitá sonda ultrazvuková. Sondy ostatních použitých metod jsou velikostně nevhodné pro měření dutých povrchů. Např. sonda přístroje Nortec 1000 má průměr dosedací plochy 8 mm, čímž mohly vznikat nepřesnosti způsobené nedoléháním celé plochy kontaktu sondy na zkoumaný povrch. Pro měření dutých ploch turbínových lopatek by byly zapotřebí sondy bodové. Další nepřesnosti do měření byly pravděpodobně vneseny již zmíněným ručním přikládáním sond ke zkoušené lopatce, kde i přes veškerou snahu nebylo v mnohých případech možné zaručit kolmost sondy k povrchu. Možný návrh řešení pro tento poznatek by mohlo být použití robotického ramene, které by dle zadaného profilu tvaru lopatky kopírovalo povrch se sondou vždy v kolmé poloze na měřené místo.

Na zkoušených lopatkách bylo nalezeno i několik míst, které bylo možné změřit metrologickými způsoby (měřicí středisko Zeiss v Tedom Jablonec, popř. posuvné měřítko). V těchto měřených bodech byly porovnány naměřené hodnoty nedestruktivními metodami s hodnotami získanými metodami metrologickými.

Jako první byla použita metoda ultrazvuková prostřednictvím defektoskopu DIO 562 a bodové sondy Olympus Parametric V260-RM. Tato metoda byla do diplomové práce zařazena z důvodu požadavku právě ultrazvukové metody zadavatelem zakázky a to První brněnskou strojírnou Velká Bíteš, která požadovala změřit tloušťky stěn u lopatky 02. Ultrazvuková metoda je běžně používána pro měření tloušťek materiálů, především oceli. Měření ocelových vzorků je poměrně snadné a i kalibrační měrky jsou z oceli zhotoveny. Při měření Inconelu jsme se potýkali s vyšším útlumem, než je tomu u oceli. Měření daných turbínových lopatek ze slitin niklu se vyznačovalo zhoršenou odečitatelností údajů z displeje z důvodu většího útlumu v těchto slitinách, což dokládá např. nepřítomnost opakovaných ech. Získaná echa navíc nejsou tak výrazná, jako tomu je u oceli. Tato skutečnost taktéž stěžuje odečítání na displeji, jelikož počáteční hrana echa není tak jednoznačně vertikální. Další možné zkreslení výsledků může zapříčinit přechod signálu ze sondy do vzorku a zpět. Použitá sonda má plastovou předsádku, která je s piezoelektrickými kontakty (krystalem) sondy vodivě spojena pomocí imerze (gelu), jež postupem času vysychá. Tato imerzní tekutina má však přibližně čtyřikrát menší rychlost zvuku, než má zkoušený materiál. Výsledky ultrazvukové metody u lopatky 02 odhalily nezanedbatelný rozptyl naměřených hodnot.

Průměr odchylek jednotlivých hodnot u této metody vychází 2,25 %, avšak v tomto případě se nejedná o příliš vypovídající hodnotu. Směrodatná odchylka měření je 14,83 % a maximální zjištěná odchylka je až 20,59 %, což odpovídá absolutní odchylce o 0,504 mm.

Další metodou použitou při zpracovávání diplomové práce byla metoda vířivých proudů. Metodu vířivých proudů využívají dva námi použité přístroje - defektoskop Nortec 1000 a tloušťkoměr NDT1 K5.

Při měření přístrojem Nortec 1000 nedostáváme konečnou hodnotu v milimetrech. Odečítání výsledků probíhá v dílcích rastru displeje přístroje. Naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotou, která byla naměřena na místě vzorku s dostatečnou tloušťkou materiálu. Takové místo označujeme jako nekonečně silné. Měření přístrojem Nortec 1000 jsme prováděli u lopatek 02 a 05 s frekvencemi 2 a 5 kHz. U lopatky 05 jsme zjistili při frekvenci 2 kHz závislost mezi hodnotami naměřených přístrojem a skutečnou tloušťkou stěny lopatky. Zjištěná závislost spočívá v mírném poklesu hodnoty odečtených dílků rastu přístroje při nárůstu skutečné tloušťky stěny lopatky. Měření na téže lopatce, avšak při frekvenci 5 kHz nejen že tuto skutečnost potvrdilo, ba dokonce je zmíněná závislost mnohem zřetelnější. Při měření u lopatky 02 jsme se potýkali s malým počtem bodů se známým skutečným rozměrem a tudíž z těchto výsledků nelze vyvozovat směrodatné závěry. Získané výsledky u této lopatky však naznačují opačnou závislost, než je tomu u lopatky 05. V případě pokračující spolupráce formou např. smluvního výzkumu mezi Technickou univerzitou v Liberci a První brněnskou strojírnou Velká Bíteš by bylo na snadě pokračovat s výzkumem při dalších frekvencích.

Měření přístrojem Nortec 1000 je také závislé na zakřivení povrchu, což dokazuje pokus s ocelovými válečky různých průměrů, které vykazovali výrazně odlišné výsledky. Přesnou geometrii měřených lopatek však neznáme, proto pokus s rozdílem hodnot na různě zakřivených površích není zahrnut do konečných výsledků měření touto metodou. Měření s přístrojem Nortec 1000 je teoreticky nejjednodušší, protože není zapotřebí žádné imerzní kapaliny ani médií vkládaných do dutin lopatky.

Druhým námi použitým přístrojem, využívající metodu vířivých proudů je tloušťkoměr NDT1 K5. Tento přístroj je primárně určen k měření tloušťek povlaků a vrstev na podkladu. Dle našeho názoru je použití tohoto přístroje k měření tloušťky stěn poměrně originálním nápadem. Pro náš pokus jsme využili magneto-indukční sondy, která je určena k měření dielektrických a vodivých neferomagnetických povlaků na feromagnetickém podkladu. Feromagnetický „podklad“ jsme vytvořili vyplněním chladících dutin pomocnými feromagnetickými médii. Použita byla tři média, s kterými byl pokus úspěšný. Jako média byly použity tryskové kuličky, jemné litinové špony a velice jemné špony z oceli označované námi jako „pěna“. Média se vyznačovala rozdílnou obtížností

manipulace i naměřenými hodnotami. Pro každé médium byla sestavena kalibrační křivka, avšak kalibrační křivky byly sestaveny pomocí plastových kalibračních měrek. Kalibrační křivky získané pro měření přístrojem NDT1 jsou lineární. Pro zlepšení vypovídající hodnoty kalibrační křivky by jistě bylo vhodnější mít podobnou sadu kalibračních měrek zhotovenou přímo z materiálu zkoušeného vzorku, v našem případě tedy z konkrétních slitin niklu. Na naměřenou hodnotu však neměla vliv pouze samotná tloušťka měřené lopatky, nýbrž i pravděpodobně tloušťka feromagnetického média uvnitř lopatky, která je výsledkem tvarově složité vnitřní dutiny lopatky, jež je médiem vyplněna. Přístrojem NDT1 bylo provedeno měření na všech lopatkách. Výsledky naměřené touto metodou se zdají být jako nejspolehlivější ze všech použitých metod. Průměr odchylek hodnot jednotlivých metod od skutečného rozměru se u této metody pohybuje v rozmezí od 3,85 do 14,61% a směrodatné odchylky vykazují hodnoty od 4,15 do 13,31%. Jako nejspolehlivější médium vyšly litinové špony, u nichž se průměr odchylek jednotlivých metod pohybuje v rozmezí od 3,85 do 6,54%, z čehož po převedení na absolutní odchylky vycházejí od 0,052 do 0,115 mm.

Měření metodou magnetické skvrny jsme prováděli na přístroji Domena B3.b. U této metody bylo využito metody magnetické skvrny a zároveň efektu oddálení od feromagnetika, k čemuž bylo opět nutné opatřit dutiny lopatek feromagnetickými médii stejnými, jako v případě měření předchozím přístrojem NDT1 K5. Pro měření přístrojem Domena byly rovněž sestaveny kalibrační křivky na jednotlivých médiích, kde se v tomto případě jedná o exponenciální závislost. Kalibrační křivky byly opět získány pomocí sady plastových kalibračních měrek přikládaných na jednotlivá média, kde měření na každé měrce proběhlo vždy dvakrát. Nadále bylo zapotřebí korigovat naměřené hodnoty dle úbytku či nárůstu hodnoty magnetizace během jednotlivých sad měření a zjištěna byla vždy změřením etalonu na začátku a na konci jednotlivých sad měření. Tento úbytek, či přírůstek je způsoben zahříváním sondy. Další vliv na měření mohly mít i vibrace vnesené do ručně držené sondy při stisku tlačítka start, které je na sondě umístěno. Rovněž u této metody má na výslednou hodnotu naměřenou přístrojem Domena vliv nejen tloušťka stěny lopatky, nýbrž i množství (tloušťka) feromagnetické podkladové vrstvy. Závislost naměřené hodnoty magnetizace na tloušťce feromagnetického podkladu je následující. Čím menší je tloušťka feromagnetického podkladu, tím větší hodnotu magnetizace přístroj naměří a naopak. To je způsobeno tím, že elektrická energie vložená do magnetického impulsu se soustřeďuje do čím dál menšího objemu feromagnetika a vytvoří se tak silnější permanentní magnet. O měření tloušťky stěn je pojednáváno v literatuře [5], jedná se však o měření rovnoměrně silných vzorků.

Zaznamenané výsledky přístrojem Domena nejsou příliš uspokojivé. Průměr odchylek se pohybuje od 6,92 do 33,86 %, což odpovídá absolutním odchylkám od 0,174 do 0,847 mm. Směrodatné odchylky se pohybují od 16,66 do 48,61 % a největší naměřená odchylka byla

zaznamenána dokonce 84,07 %, což odpovídá absolutní odchylce 2,22 mm! Obecně se měření s přístrojem Domena vyznačuje velkým rozptylem naměřených hodnot.

Interpretace výsledků získaných měření nedestruktivními metodami bohužel není snadná. Přístroje většinou neudávají konečný výsledek, který je následně nutno získat korekcemi a výpočty. I přes opakovaná měření se ve výsledcích mnohdy vyskytují i hodnoty, které se výrazně liší od naměřených hodnot získaných mechanickými způsoby měření. Největší zaznamenaná odchylka měření je 84,07 % u lopatky T40, měřeno přístrojem Domena, médium-kuličky. Dokazuje to nesnadnost prezentované problematiky, kdy za důvody můžeme považovat chybu lidského faktoru, obtížné dosahování kolmosti sond na povrch vzorku, v některých případech nedoléhání celého povrchu sondy na složité radiusy křivých povrch stěn a v neposlední řadě i rozdílné tvary vnějšího profilu lopatky s profilem vnitřní dutiny a tudíž nerovnoběžnost normál těchto profilů.



## 5 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na stanovení tloušťky stěn dutých lopatek plynových turbín ze žárovevných Ni a Co slitin. V případě dodaných vzorků turbínových lopatek se však jedná pouze o tzv. superslitiny Ni, konkrétně Inconel 713 LC u lopatek 02 a 05 a MAR-M 247 v případě lopatky T40. Dále se diplomová práce zabývá porovnáním výsledků několika metod (UT, ET, MT), přičemž má práce poskytnout náhled jakým směrem vést případný další výzkum měření tloušťek stěn dutých lopatek.

V teoretické části jsou představeny metody nedestruktivního zkoušení a niklové slitiny.

Experimentální část diplomové práce představuje výsledky měření, které jsme získali pomocí tří metod – metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny. Měření probíhalo pomocí čtyř přístrojů a to: Dio 562, Nortec 1000, NDT1 K5 a Domena B3.

Experiment diplomové práce prokázal možnost měření tloušťek turbínových lopatek všemi metodami, avšak s rozdílnou přesností a použitelností. Jako metoda s nejlepšími výsledky se jeví měření s tloušťkoměrem NDT1 K5. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití litinových špon jako pomocného feromagnetického média. V této kombinaci přístroje a média bylo dosaženo průměru odchylek jednotlivých měření od 3,85 do 6,54 %, absolutní odchylky vycházejí od 0,052 do 0,115 mm a směrodatné odchylky od 4,66 do 9,35 %.

Před případnou konkrétní aplikací daných metod by byl nezbytný aplikační vývoj, který by stanovil přesné podmínky měření, zajistil by přesné polohování sondy a sestavil korekční křivky.

## 6 Zdroje

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [3] Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. [Http://www.mistrasgroup.gr/](http://www.mistrasgroup.gr/) [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://www.mistrasgroup.gr/products/ultrasonic/pdf/Panametrics\\_UT\\_Transducers.pdf](http://www.mistrasgroup.gr/products/ultrasonic/pdf/Panametrics_UT_Transducers.pdf)
- [4] DVOŘÁK, Jiří. *Akustická emise magnetických impulsu metody magnetického bodového pólu*. Liberec, 2008. Diplomová práce.
- [5] SKRBEK, Břetislav. *Pokroky v oblasti nedestruktivního zkoušení*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2014, 56 s. ISBN 978-80-7494-165-8.
- [6] LHOTÁK, Pavel. *Optimalizace měřicího cyklu přístroje CASTA*. Liberec, 2010. Diplomová práce.
- [7] SKRBEK, Břetislav. *Metoda magnetické skvrny: teze profesorské přednášky*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 31 s. ISBN 978-80-7372-428-3.
- [8] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2014-02]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit. 2015-04-15]. pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelná turbína a turbokompresor, *Transformační technologie*, 2011-02, [last updated 2014-02]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit. 2015-04-15]. pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>
- [10] Gas Turbine. *Minnesota State University Mankato* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components\\_gasturbine.html](http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components_gasturbine.html)
- [11] *PCC Forged Products* [online]. 2013 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.pccforgedproducts.com/products/>

- [12] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [13] *Nickel Alloys.Net* [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.nickel-alloys.net/nickelalloys.html#\\_Nickel\\_Copper\\_Alloys](http://www.nickel-alloys.net/nickelalloys.html#_Nickel_Copper_Alloys)
- [14] HAKL, Jan a Tomáš VLASÁK. *ŽÁRUPEVNÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH SUPERSLITIN NA BÁZI Ni* [online]. In: . Hradec nad Moravicí, 2005 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_05/papers/178.pdf](http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_05/papers/178.pdf)
- [15] SMÉKALOVÁ, Jana. *VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI LITÝCH NIKLOVÝCH SLITIN. BRNO, 2008*. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7380](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7380) . Bakalářská práce.
- [16] JÍŠA, Jakub. *MECHANISMUS ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ SUPERSLITINY MAR-M 247*. BRNO, 2008. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=88226](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88226) . Diplomová práce.
- [17] KREIDL, Marcel. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha: Starmans electronics, 2011, 217 s. ISBN 978-80-254-6606-3.
- [18] Engineering Properties of ALLOY 713 LC. In: *Nickelinstitute.org* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://www.nickelinstitute.org/~media/files/technicalliterature/alloy713c\\_337\\_.ashx](http://www.nickelinstitute.org/~media/files/technicalliterature/alloy713c_337_.ashx)
- [19] NDT1 Kraft. <Http://www.ndtone.com/> [online]. 2009 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.ndtone.com/cze/k5.cze.htm>

## 7 Seznam příloh

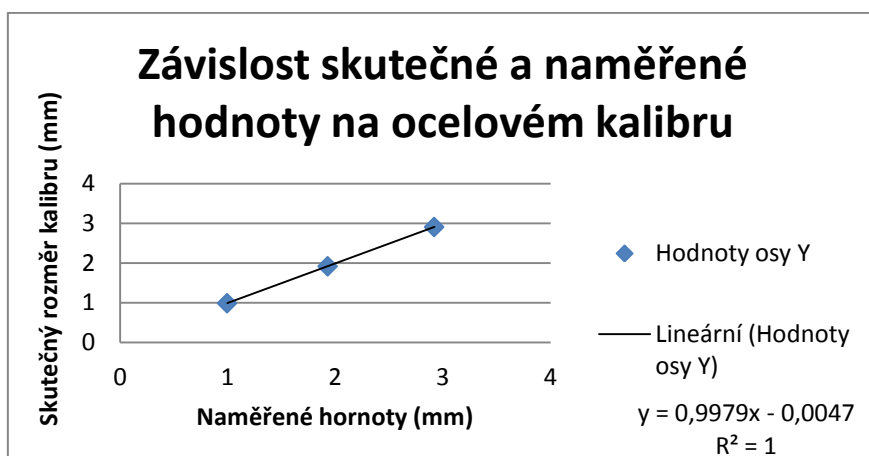
- Příloha 1. Tabulka naměřených hodnot ultrazvukovým defektoskopem Dio 562
- Příloha 2. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na ocelovém kalibru
- Příloha 3. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu - kuličky
- Příloha 4. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu - lit. špony
- Příloha 5. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu - navlhčené litinové špony
- Příloha 6. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu – brusná pěna
- Příloha 7. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na bronzovém kalibru
- Příloha 8. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na kalibru F, přístroje NDT1
- Příloha 9. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu - kuličky
- Příloha 10. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu - litinové špony
- Příloha 11. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu - brusná pěna
- Příloha 12. Standardní hloubka vniku pro metodu vířivých proudů
- Příloha 13. Výkres lopatky 02
- Příloha 14. Výkres lopatky T40

## Přílohy

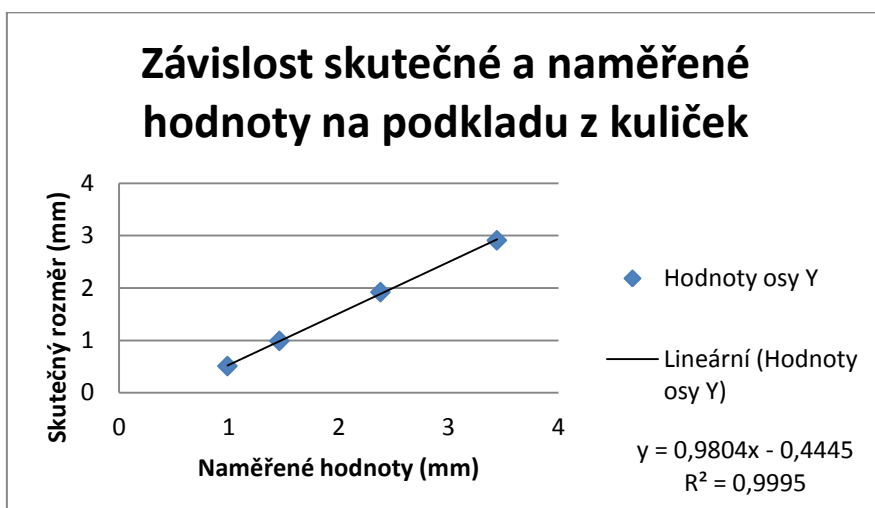
Příloha 1. Tabulka naměřených hodnot ultrazvukovým defektoskopem Dio 562

	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L6</b>
<b>9</b>	2,58	2,68	-
<b>8</b>	2,58	2,58	-
<b>7</b>	2,4	2,03	2,58
<b>6</b>	2,31	2,40	2,58
<b>5</b>	2,21	2,60	2,95
<b>4</b>	2,40	2,40	2,58
<b>3</b>	2,03	2,49	2,58
<b>2</b>	2,58	3,51	2,95
<b>1</b>	2,77	4,06	2,48
<b>0</b>	2,58	3,88	3,32
<b>-1</b>	3,14	3,32	2,77
<b>-2</b>	2,95	2,21	2,58
<b>-3</b>	2,86	2,40	2,21
<b>-4</b>	2,77	2,40	2,03
<b>-5</b>	2,40	2,40	2,40
<b>-6</b>	2,40	2,21	-
<b>-7</b>	1,94	-	-
<b>-8 (fiktivní)</b>	6,8	-	-

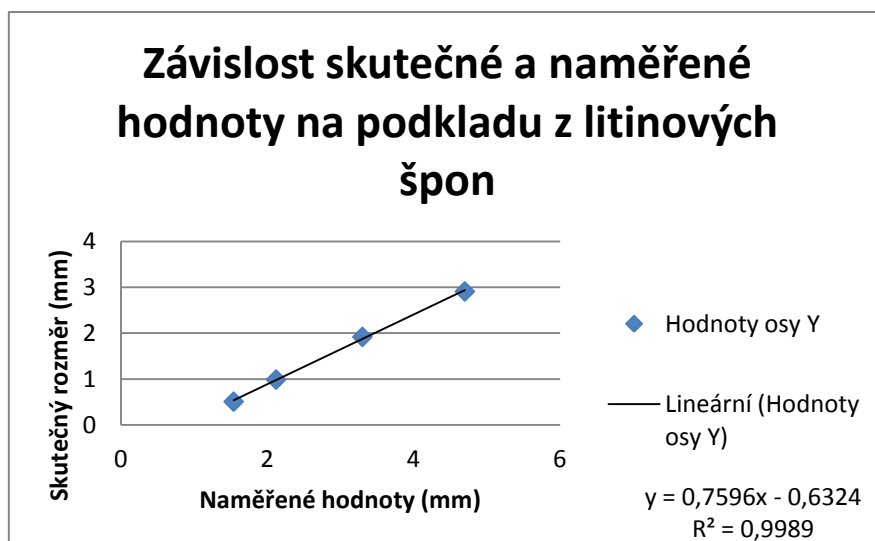
Příloha 2. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na ocelovém kalibru



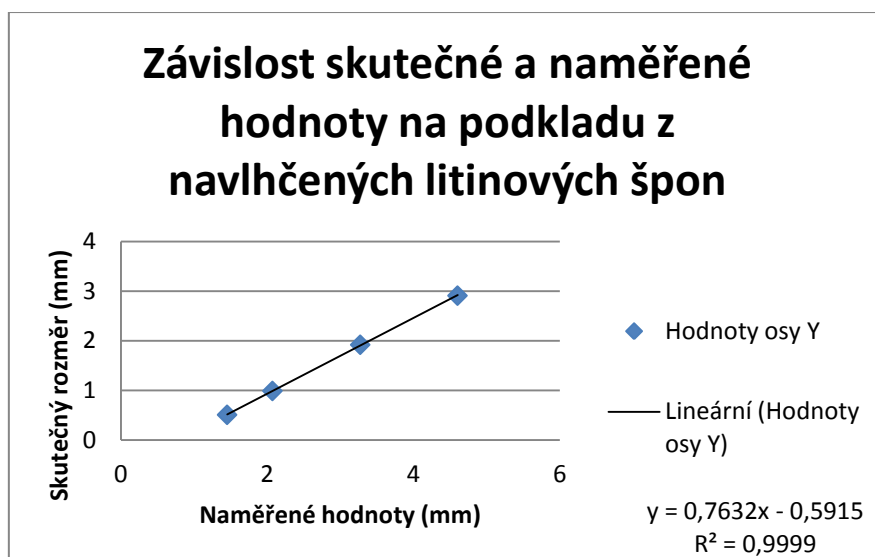
Příloha 3. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu - kuličky



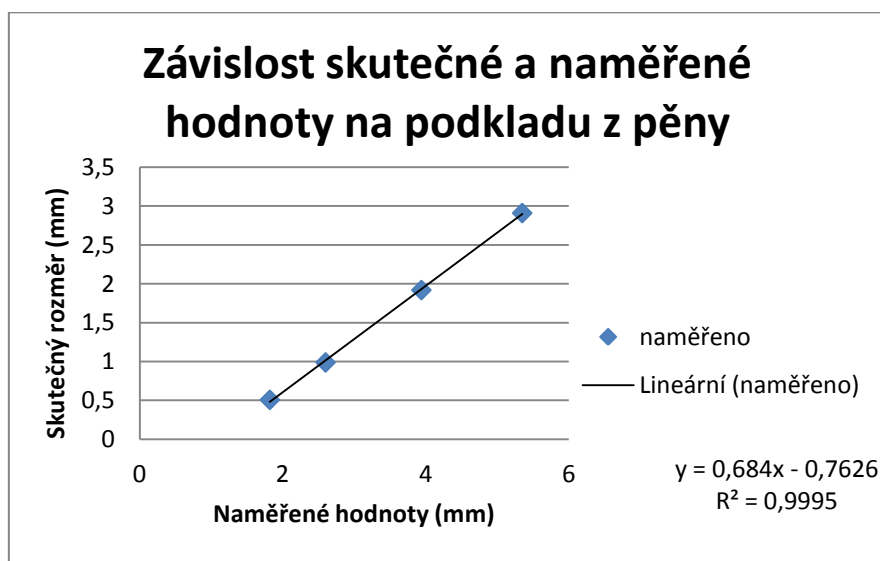
Příloha 4. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu – lit. špony



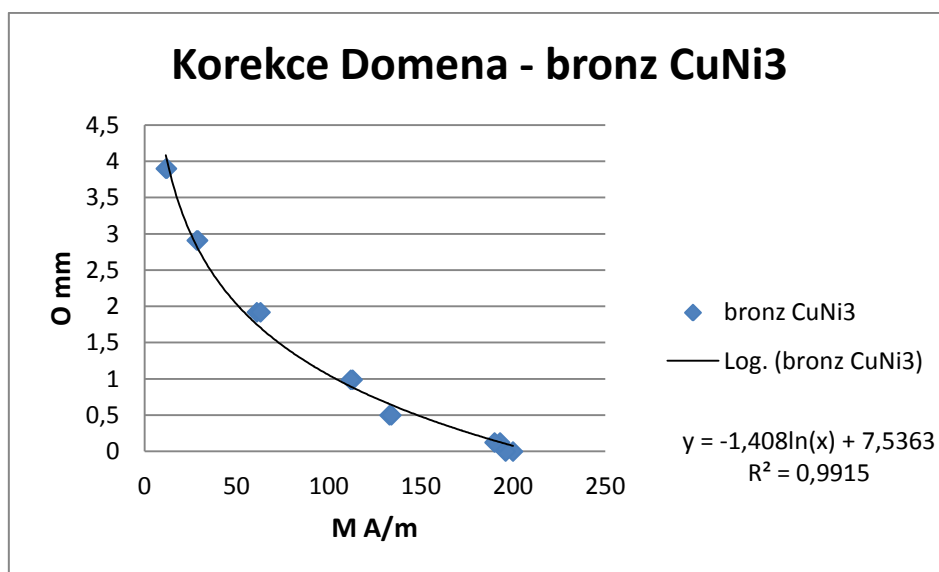
Příloha 5. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu – navlhčené litinové špony



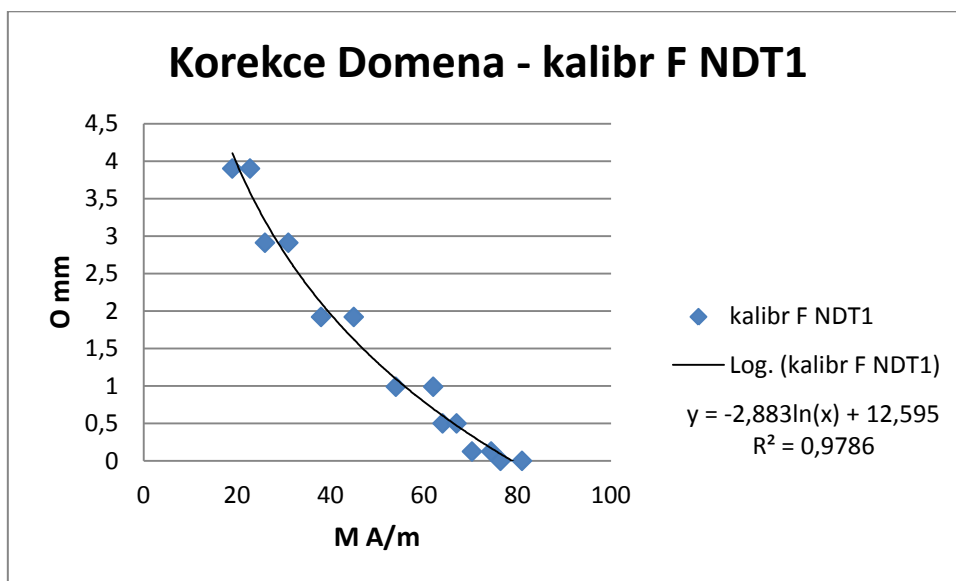
Příloha 6. Korekční křivka pro měření tloušťkoměrem NDT1 K5 na pomocném médiu – brusná pěna



Příloha 7. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na bronzovém kalibru

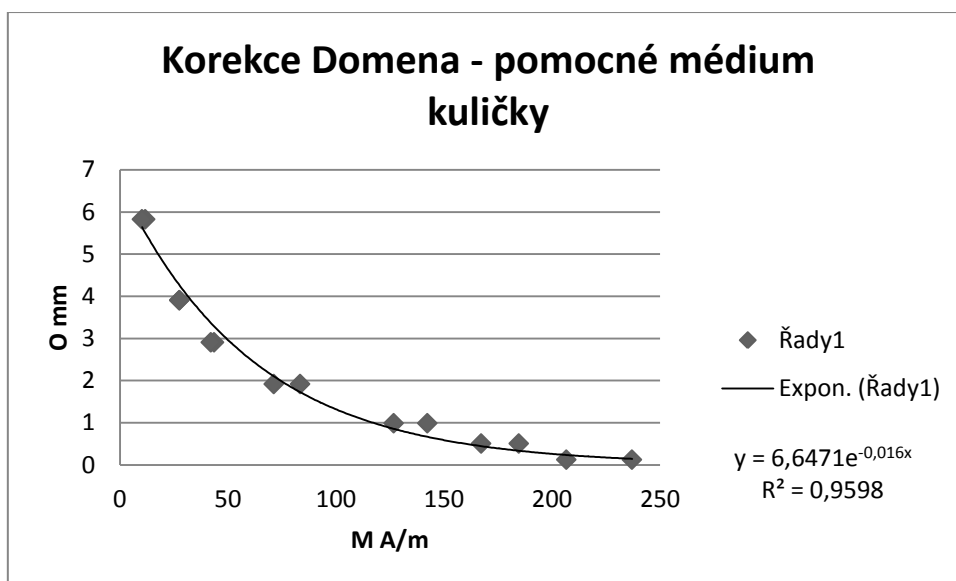


Příloha 8. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na kalibru F, přístroje NDT1

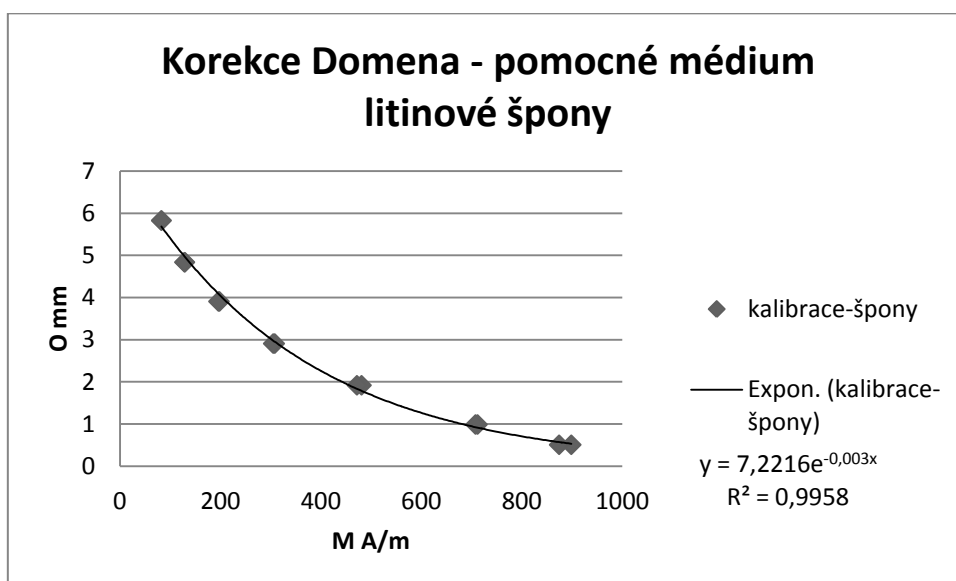




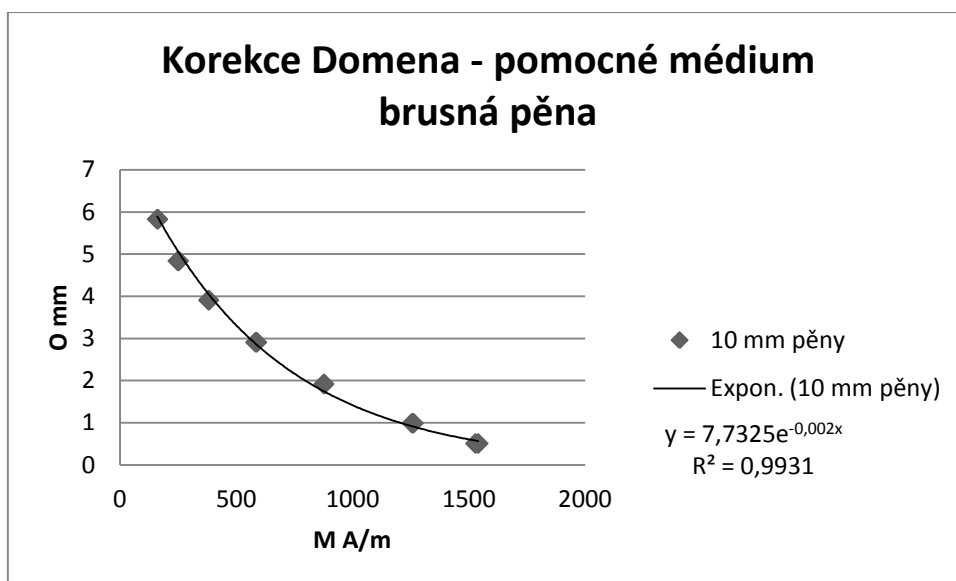
Příloha 9. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu – kuličky



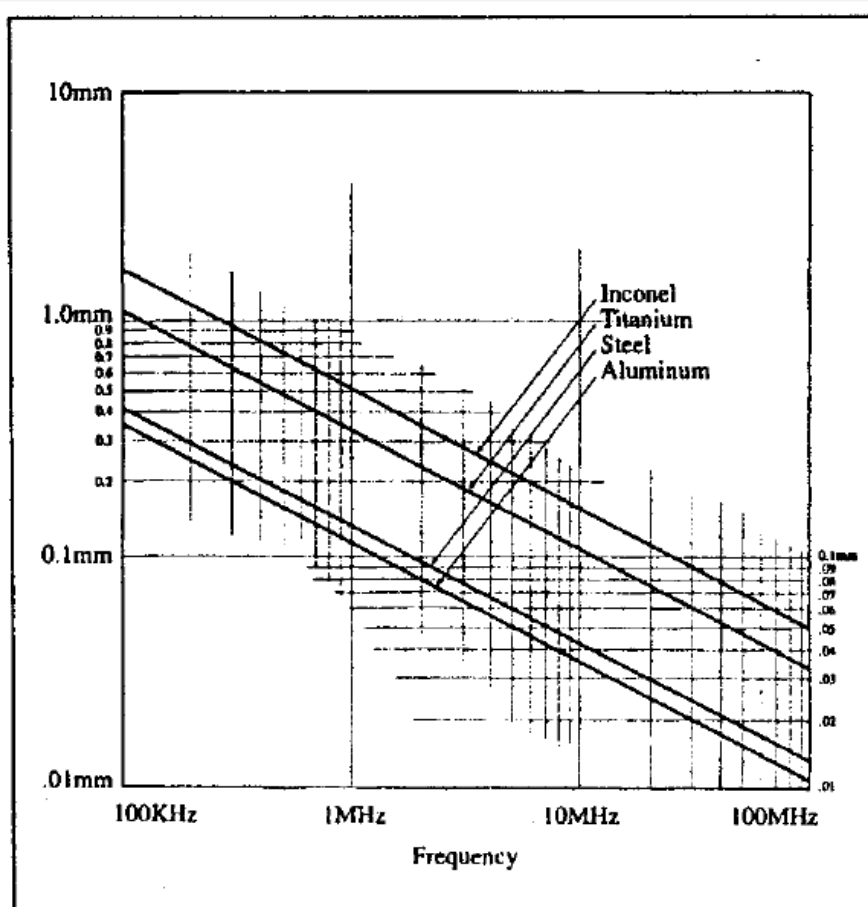
Příloha 10. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu – litinové špony

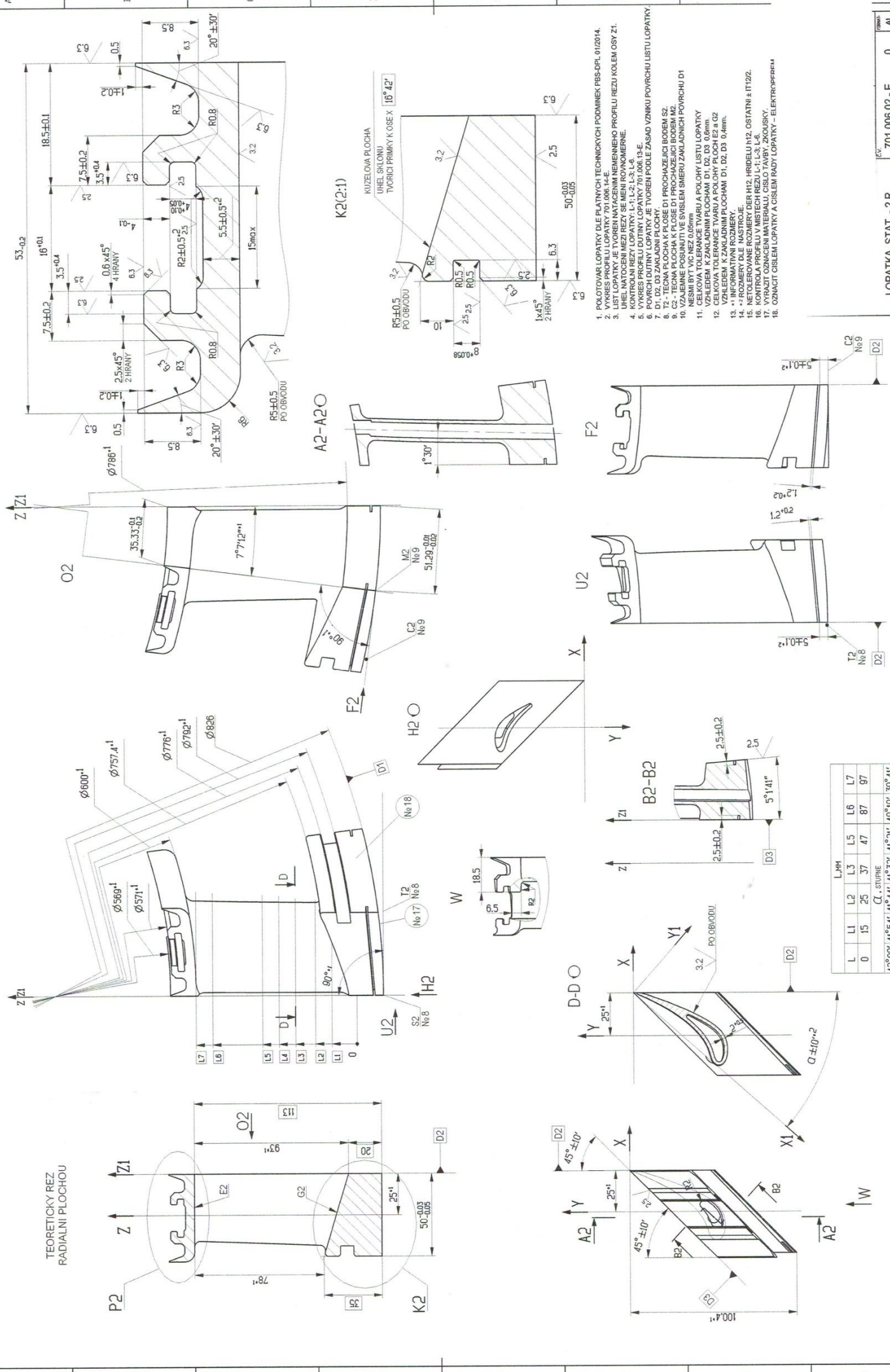


Příloha 11. Korekční křivka pro měření strukturoskopem Domena B3.b na pomocném médiu – brusná pěna



Příloha 12. Standardní hloubka vniku pro metodu vířivých proudů





L, MM						
	L	L1	L2	L3	L5	L6
	0	15	25	37	47	87

LOPATKA STAT. - 2.R.

701.006.02 - E	0	AI	AL
----------------	---	----	----

